

# PHA2USE: NAAR DE COMMERCIEËLE PRODUCTIE VAN EEN PLASTICVERVANGER UIT COMMUNAAL ZUIVERINGSSLIB



PHA2USE: NAAR DE COMMERCIËLE PRODUCTIE VAN EEN  
PLASTICVERVANGER UIT COMMUNAAL ZUIVERINGSSLIB

RAPPORT

2024

42

PHA2USE partners:



Mede gefinancierd door:



Ondersteund door:



ISBN 978.94.6479.096.2



stowa@stowa.nl www.stowa.nl  
TEL 033 460 32 00  
Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort  
POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

Publicaties van de STOWA kunt u gratis downloaden via [www.stowa.nl/publicaties](http://www.stowa.nl/publicaties)

# COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer  
Postbus 2180  
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Leon Korving, Aiforo  
Henk Dijkman, Paques Biomaterials  
Joao Sousa, Paques Biomaterials  
René Veltman, Paques Biomaterials  
Chris Vermeer, Paques Biomaterials  
Richard Schrama, Paques Biomaterials  
Martijn Bovee, Aquaminerals

## BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Dennis Froeling, N.V. HVC  
Bart Joosse, waterschap Brabantse Delta  
Olaf Duin, waterschap Hollandse Delta  
Els van Soelen, waterschap Scheldestromen  
Aad Oomens, waterschap De Dommel  
Hans de Vries, Wetterskip Fryslân  
Cora Uijterlinde, STOWA

VORMGEVING Buro Vormvast  
STOWA STOWA 2024-42  
ISBN 978.94.6479.096.2

De inhoud van deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden in de publicatie, of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud ervan.

STOWA spant zich in de rechthebbenden van in de uitgave gebruikte afbeeldingen te respecteren conform het auteursrecht. Indien u desondanks van mening bent dat uw rechten in het geding zijn, dan verzoeken wij u contact met ons op te nemen.

# TEN GELEIDE

## **GOED OP WEG NAAR DE COMMERCIELE PRODUCTIE VAN EEN PLASTICVERVANGER UIT ZUIVERINGSSLIB**

**Dit rapport geeft een overzicht van de resultaten die bereikt zijn voor het verder opschalen en verkennen van de markt voor een goed afbreekbare plasticvervanger gemaakt uit zuiveringslib. Deze resultaten zijn bereikt in het kader van het PHA2USE project.**

De productie van een plasticvervanger uit zuiveringslib is één van de initiatieven die door de waterschappen zijn geïdentificeerd als een kansrijke ontwikkeling voor het terugwinnen van grondstoffen. In het PHARIO-project (2015 tot 2017) zijn daarvoor al succesvolle pilotproeven uitgevoerd. Ook was de techniek al op pilotschaal getest op industrieel afvalwater door Paques. In vervolg hierop hebben vijf waterschappen, STOWA, HVC en Paques Biomaterials in het PHA2USE-project samengewerkt om deze ontwikkeling verder op te schalen, zowel voor reststromen van waterschappen en van de industrie. Het belangrijkste doel van het project was om een zodanige schaalgrootte te realiseren dat er voldoende materiaal ter beschikking zou komen. Hiermee kunnen materiaaleigenschappen worden vastgesteld om een goede indruk te krijgen van het marktpotentieel.

Met deze ontwikkeling kunnen waterschappen niet alleen een waardevolle grondstof terugwinnen maar maken zij ook een product met een grote maatschappelijke relevantie. De verspreiding van microplastics in ons milieu en oppervlaktewater is een sterk opkomend maatschappelijk thema. De plasticvervanger die in het PHA2USE project gemaakt wordt is juist een natuurlijk materiaal dat uitstekend afbreekbaar is en tegelijk vergelijkbare eigenschappen heeft als plastics. Deze plasticvervanger noemen we tegenwoordig Caleyda® en het is een biopolymeer die chemisch gezien geschaard wordt onder de familie van polyhydroxyalkanoaten ofwel PHA.

Het project heeft waardevolle informatie opgeleverd over de opschalingsmogelijkheden en veel processtappen hebben hun robuustheid bewezen op deze grotere schaal. Tegelijkertijd zijn er belangrijke aandachtspunten naar voren gekomen die moeten worden opgelost voordat het raadzaam is om een investering te doen in een volgende schaalstap. Een belangrijk aandachtspunt is bijvoorbeeld het verlagen van de kosten van productie van vetzuren uit zuiveringslib.

Het project heeft een grote hoeveelheid Caleyda® opgeleverd waardoor grote stappen zijn gezet in de ontwikkeling van toepassingen voor dit materiaal. De marktontwikkeling blijkt echter wel tijdrovend en de begrensde beschikbaarheid van Caleyda® blijft een beperking. Om dit op te lossen heeft Paques Biomaterials via een financieringsronde 14 M€ opgehaald, waarmee onder andere een extractiefaciliteit in Emmen gerealiseerd wordt waarmee ook het resterende halffabricaat van het PHA2USE project kan worden omgezet in Caleyda®. Het is bemoedigend om te zien dat het bedrijf Paques Biomaterials dat tijdens het project is opgericht nu al gegroeid is tot een bedrijf van meer dan 20 werknemers die in staat is investeerders te interesseren.

Het project laat zien dat er een duidelijke vraag is naar Caleyda® die ook nog eens toeneemt en de technologie heeft tijdens het project een sterke ontwikkeling doorgemaakt. Dit biedt veel perspectief voor deze ontwikkeling. Wel moeten er nog wel enkele zaken worden uitgezocht voordat waterschappen een grote investering kunnen doen in grootschalige productie. Het ongelijke speelveld in de stimulering van biogasproductie versus grondstoffenproductie is daarbij een punt van zorg. Mede gezien de hoge ambities van de waterschappen om toe te groeien naar een circulaire economie is het belangrijk om in beweging te blijven en deze kans verder te ontwikkelen.

Mark van der Werf  
Directeur STOWA

# SAMENVATTING

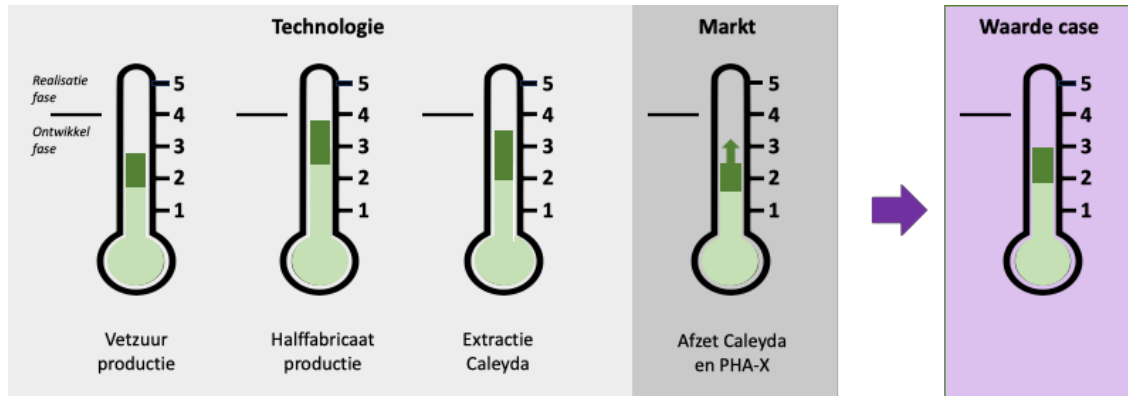
De rijksoverheid en waterschappen hebben ambitieuze doelstellingen gedefinieerd om in 2050 volledig circulair te zijn. De waterschappen hebben zich daarom verenigd in verschillende koplopergroepen om de winning van enkele kansrijke grondstoffen uit zuiveringsslib verder te ontwikkelen, zoals de productie van een natuurlijke en afbreekbare plasticvervanger uit zuiveringsslib. De productie van een plasticvervanger is een alternatief voor de productie van biogas uit zuiveringsslib met een hogere maatschappelijke waarde. De waarde is significant hoger en er is een toenemende maatschappelijke vraag naar materialen die wel de voordelen van plastics hebben maar niet de nadelen, zoals bijvoorbeeld de verspreiding van microplastics en de emissie van CO<sub>2</sub>.

In vervolg op eerdere projecten hebben vijf waterschappen, STOWA, HVC en Paques Biomaterials in 2020 een samenwerkingsovereenkomst getekend om in het PHA2USE project deze ontwikkeling op te schalen. Hiertoe is een proefinstallatie gerealiseerd in Dordrecht waarin twee jaar lang een halffabricaat is geproduceerd waaruit Caleyda®, een afbreekbare plasticvervanger, kan worden teruggewonnen. Als grondstoffen zijn vetzuren gebruikt die zijn gemaakt uit primair slib en industriële organische afvalwaterstromen. Als actieve biomassa is secundair slib van de rwzi Bath gebruikt. Uit een deel van dit halffabricaat is 215 kg Caleyda® geëxtraheerd in faciliteiten in Duitsland. Het resterende materiaal is opgeslagen en nog beschikbaar voor latere extractie. Het geproduceerde Caleyda® is ter beschikking gesteld aan toekomstige afnemers van het materiaal die hiervoor mogelijke toepassingen hebben getest.

Het project heeft waardevolle informatie opgeleverd over de opschalingsmogelijkheden en veel processtappen hebben hun robuustheid bewezen op deze grotere schaal. Tegelijkertijd zijn er belangrijke aandachtspunten naar voren gekomen die moeten worden opgelost voordat het raadzaam is om een investering te doen in een volgende schaalstap. Het project heeft bovendien een grote hoeveelheid Caleyda® opgeleverd waardoor grote stappen zijn en nog kunnen worden gezet in de ontwikkeling van toepassingen voor dit materiaal. De ontwikkeling daarvan is echter tijdrovend en de begrensde beschikbaarheid van Caleyda® blijft nog een beperking. Om dit op te lossen heeft Paques Biomaterials via een financieringsronde 14 M€ opgehaald, waarmee onder andere een extractiefaciliteit in Emmen gerealiseerd wordt waarmee ook het resterende halffabricaat van het PHA2USE project kan worden omgezet in Caleyda®. Mede door het PHA2USE-project is het bedrijf Paques Biomaterials gegroeid tot een onderneming met meer dan 20 werknemers.

Onderstaande thermometers geven een inschatting van de volwassenheid van de aspecten van de waardeketen om Caleyda® uit zuiveringsslib te maken. Bij niveau 5 staan alle seinen op groen voor een investering in een eerste commerciële installatie bij de waterschappen en is er een detailontwerp beschikbaar. Op niveau 1 bevindt het concept zich nog in de idee fase. Het donkergroene deel geeft de ontwikkeling aan in het PHA2USE-project. De thermometers laten zien dat er in het project een sterke ontwikkeling heeft plaatsgevonden maar dat het minimaal gewenste niveau 4 is nog niet is bereikt voor alle aspecten.

FIGUUR 1 CALEYDA IS AFBREEKBAAR EN GEMAAKT UIT RESTSTROMEN EN DAARDOOR DUURZAMER DAN ANDERE (BIO)PLASTICS



Niettemin is de inschatting van de projectpartners dat de technologie en waardeketen nog steeds voldoende perspectief bieden en dat huidige onzekerheden in de toekomst kunnen worden opgelost. Mede gezien de hoge ambities van de waterschappen om toe te groeien naar een circulaire economie lijkt het gerechtvaardigd om deze ontwikkeling te blijven doorzetten en steunen. Er zijn concrete aanbevelingen om gedurende een beperkte periode van een jaar verdere voorbereidende stappen te nemen voor twee specifieke locaties bij Waterschap Brabantse Delta en De Dommel.

# STOWA IN HET KORT

## HOE WE WERKEN

STOWA is het kennis- en innovatiecentrum voor regionale waterbeheerders in Nederland; de waterschappen en provincies. We helpen ze met het verkrijgen van nieuwe kennis en inzichten die nodig zijn om de opgaven van de regionale waterbeheerders beter te kunnen uitvoeren. Dat doen we door kennisvragen te formuleren en te selecteren in programmacommissies. We zetten ons onderzoek uit bij een keur aan experts, adviesbureaus, instituten en universiteiten, die we begeleiden tijdens hun werk. We zorgen voor de beschikbaarstelling en verspreiding van de kennis, inzichten en antwoorden aan de gezamenlijke waterbeheerders. We stimuleren de uitwisseling van kennis en ervaringen, via bijeenkomsten, werkgroepen, excursies, conferenties en communities of practice. We werken samen met onder andere ministeries, Rijkswaterstaat, gemeenten, drinkwaterbedrijven.

## WAT WE ONDERZOEKEN

Inhoudelijk richt STOWA zich op alle onderdelen van waterbeheer, van waterkering en stedelijk waterbeheer tot waterzuivering en watersystemen. Belangrijke thema's daarbij zijn klimaatadaptatie, waterveiligheid, waterkwaliteit en ecologie, energietransitie en circulaire economie.

De kennisvragen die STOWA beantwoordt liggen meestal op technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied. Onze kennis is altijd gericht op de praktijk van regionale waterbeheerders. Dat is waar we voor staan, als Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.

## WIE WE ZIJN

STOWA is als kennisorganisatie onafhankelijk, onpartijdig en transparant. De afnemers van onze kennis moeten erop kunnen vertrouwen dat de inhoud van onze rapporten objectief en representatief is. Alleen zo kan onze kennis worden ingezet voor beter waterbeheer en innovaties die antwoord geven op de uitdagingen van vandaag en morgen. Het is aan regionale waterbeheerders zelf te bepalen hoe ze de kennis van STOWA in de praktijk gebruiken. STOWA kan daarbij een rol spelen als adviseur, maar is geen uitvoerder of regisseur.

STOWA is een stichting die de richtlijnen volgt voor organisaties zonder winstoogmerk (RJ-640). In ons jaarverslag is daarom naast de cijfermatige jaarrekening onder meer ook een directieverslag over de stichting, haar activiteiten en kentallen opgenomen.

# PHA2USE: NAAR DE COMMERCIELE PRODUCTIE VAN EEN PLASTICVERVANGER UIT COMMUNAAL ZUIVERINGSSLIB

## INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	STOWA IN HET KORT	
<b>1</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ACHTERGRONDEN</b>	<b>3</b>
	2.1 Samen naar een circulaire economie	3
	2.2 Caleyda®: een afbreekbare plasticvervanger	3
	2.3 Productieproces voor het maken van Caleyda®	5
	2.4 Het PHA2USE-project	6
<b>3</b>	<b>TECHNISCHE RESULTATEN VAN HET PROJECT</b>	<b>8</b>
	3.1 Inleiding	8
	3.2 Productie van PHA-rijk halffabricaat	8
	3.2.1 Voorbereidende testen	8
	3.2.2 Korte technische beschrijving van de PHA2USE demo-installatie in Dordrecht	9
	3.2.3 Beschrijving uitgevoerde testen	11
	3.2.4 Resultaten	12
	3.3 Extractie	23
<b>4</b>	<b>TOEPASSING VAN CALEYDA®</b>	<b>25</b>
	4.1 PHA: Productiecapaciteit en marktaandeel	25
	4.2 Vergelijking Caleyda® met andere bioplastics	25
	4.3 Resultaten interactie met applicatiepartners	27
	4.3.1 Inleiding	27
	4.3.2 Selectie partners	27
	4.3.3 Resultaten marktontwikkeling	27
	4.3.4 Einde afval status	29
	4.4 Conclusie	31



<b>5</b>	<b>VETZUREN UIT ZUIVERINGSSLIB VOOR CALEYDA®</b>	<b>33</b>
<b>5.1</b>	Inleiding	33
<b>5.2</b>	Industriële bronnen voor vetzuren voor de accumulatie aanpak	33
5.2.1	Directe lozingen	34
5.2.2	Voorzuivering (vaak eigen biogas productie)	34
5.2.3	Organische restromen uit de handel	34
<b>5.3</b>	Zuiveringslib als vetzuurbron	35
5.3.1	Literatuuronderzoek	35
5.3.2	Labproeven	36
5.3.3	Praktijkproef Oldenzaal	38
5.3.4	Conclusie	40
<b>5.4</b>	Productie van VFA en PHA versus biogasproductie	40
<b>5.5</b>	Kansen voor innovatie in vetzuurproductie uit slib	41
<b>5.6</b>	Conclusie	42
<b>6</b>	<b>WAARDECASE VOOR CALEYDA®</b>	<b>44</b>
<b>6.1</b>	Het plasticprobleem en zorgen rondom microplastics	44
<b>6.2</b>	Productie van PHA-rijk halffabricaat bij waterschappen	45
<b>6.3</b>	Selectie versus PHARIO-aanpak	47
<b>6.4</b>	Extractie van PHA-rijk halffabricaat	48
<b>6.5</b>	Resultaten LCA-studie	49
<b>6.6</b>	Ontwikkelpunten en onzekerheden voor de waarde case	50
<b>7</b>	<b>ONTWIKKELINGEN RONDOM PHA2USE</b>	<b>51</b>
<b>7.1</b>	Ontstaan en groei van Paques Biomaterials	51
<b>7.2</b>	Nationale en internationale erkenning	51
<b>8</b>	<b>EVALUATIE</b>	<b>53</b>
<b>8.1</b>	Samenvatting resultaten van PHA2USE	53
<b>8.2</b>	Stand van de ontwikkeling	53
<b>8.3</b>	Routekaart naar opschaling	56
<b>9</b>	<b>CONCLUSIE</b>	<b>58</b>
<b>10</b>	<b>ACHTERGRONDDOCUMENTEN</b>	<b>60</b>

# 1

## INLEIDING

Dit rapport beschrijft de resultaten van het PHA2USE-project. Dit project vond plaats van 23 september 2020 tot en met 23 september 2024.

PHA2USE is een samenwerking van vijf waterschappen (Brabantse Delta, Hollandse Delta, Scheldestromen, Fryslân en De Dommel), STOWA, HVC en Paques Biomaterials die in 2020 is gestart om een belangrijke stap te zetten in de opschaling van de productie van een plasticvervanger uit organische reststromen, zoals zuiveringsslib. Daarvoor was het vooral nodig om grotere hoeveelheden van deze plasticvervanger te produceren teneinde zo goed inzicht te krijgen over de afzetbaarheid van dit product. Zekerheid over afzet is namelijk nodig om investeringen in de productie door waterschappen en/of private partijen mogelijk te maken.

In dit project hebben we het over een “plasticvervanger” en niet meer over “bioplastic”. De reden hiervoor is dat de term “bioplastic” vaak verwarrend is omdat dit een heel scala aan wel en niet afbreekbare plastic-achtige materialen omvat. Met de term “plasticvervanger” willen we benadrukken dat het materiaal geen plastic is maar een natuurlijk en volledig afbreekbaar materiaal en dus ook niet de nadelen heeft van dit plastic. Wel kan het in bepaalde toepassingen plastic vervangen. Het materiaal dat in dit project gemaakt wordt heeft de technische naam “polyhydroxyalkanoaat” ofwel PHA. Dit is in feite een goed afbreekbaar en natuurlijk polyester dat door natuurlijke bacteriën kan worden gemaakt. De familie van PHA soorten is vrij breed en het PHA dat uit organische reststromen gemaakt wordt op de manier die in het PHA2USE materiaal opgeschaald is noemen we tegenwoordig Caleyda®.

Dit is een openbaar rapport met de resultaten van het PHA2USE-project en bevat zoveel mogelijk resultaten die in openbaarheid gedeeld kunnen worden opdat andere waterschappen zo goed mogelijk geïnformeerd worden over de ontwikkeling die heeft plaatsgevonden in het project. Omdat het vermarkten van herwonnen grondstoffen vaak in concurrentie met andere grondstoffen gebeurt en in interactie en samenwerking met private partijen kan niet alle in het project verkregen informatie openbaar gedeeld worden. Er zijn meer gedetailleerde achterliggende rapportages beschikbaar en deze kunnen op verzoek toegankelijk worden gemaakt voor andere waterschappen die op basis van deze openbare resultaten overwegen om deze techniek toe te passen en de ontwikkeling naar opschaling te steunen.

### LEESWIJZER

In het rapport wordt in **hoofdstuk 2** eerst wat **achtergronden** voor het project besproken zoals de manier waarop deze plasticvervanger kan worden gemaakt en hoe dit materiaal zich verhoudt tot andere (bio)plastics. **Hoofdstuk 3** gaat in op de resultaten van de belangrijkste activiteit in het project, namelijk de **productie** van een PHA-rijk halffabricaat in de een demonstratie installatie in Dordrecht en de campagne-gewijze extractie van PHA uit dit materiaal in bestaande, gehuurde industriële apparatuur in Duitsland. Na deze stap is uiteindelijk de plasticvervanger ofwel Caleyda® beschikbaar. **Hoofdstuk 4** gaat vervolgens in op het **marktpotentieel** voor dit materiaal en geeft een samenvatting van de resultaten die verkregen zijn uit interacties met partners die het materiaal kunnen omzetten in toepas-

singen. De belangrijkste grondstof voor het maken van PHA zijn organische reststromen die omgezet kunnen worden in vetzuren door een fermentatieproces. Het hoofddoel van het PHA2USE-project was om aan de achterkant te beginnen en eerst aan te tonen dat er vraag is voor Caleyda. De productie van deze vetzuren was daarom geen hoofdpunt voor het project maar is uiteindelijk wel belangrijk. **Hoofdstuk 5** gaat daarom meer in detail in op de manier waarop waterschappen **vetzuren** kunnen maken uit het eigen slib en wat daarbij de aandachtspunten zijn. Ook wordt een mogelijke synergie met industriële reststromen besproken. Tenslotte gaat **Hoofdstuk 6** in op de **waardecase** voor het maken van Caleyda uit zuiveringsslib. In het kader van het project zijn kostenramingen gemaakt voor vier specifieke locaties voor het maken van een PHA-rijk halffabricaat door de waterschappen en de daaropvolgende extractie. Tevens worden de resultaten van een door STOWA uitgevoerde LCA studie samengevat. **Hoofdstuk 7** bespreekt de **ontwikkelingen rondom** het project. Mede door het PHA2USE-project is het bedrijf Paques Biomaterials ontstaan en gegroeid. Bovendien trok het project veel aandacht en bleek het erg inspirerend te zijn voor veel belanghebbende getuige de diverse prijzen die het project heeft gewonnen. Tenslotte wordt in **hoofdstuk 8** teruggekeken op de ontwikkeling van de techniek en wordt een **evaluatie** gemaakt van wat er nog moet gebeuren voordat deze techniek op grote schaal kan worden gerealiseerd. Dit leidt uiteraard tot een **eindconclusie** in **hoofdstuk 9**.

# 2

## ACHTERGRONDEN

### 2.1 SAMEN NAAR EEN CIRCULAIRE ECONOMIE

Een volledig circulaire economie in 2050. Dat is de doelstelling die de Rijksoverheid in het Grondstoffenakkoord heeft afgesproken met de waterschappen en veel bedrijven, overheden, natuur- en milieuorganisaties, kennisinstituten en andere organisaties. De afspraken uit dit akkoord zijn uitgewerkt in het Nationaal Programma Circulaire Economie 2023 – 2030.

Met deze ambities en afspraken als kader zijn de waterschappen al meer dan tien jaar bezig met verschillende initiatieven om hun afvalproducten om te zetten in waardevolle producten. Onder de vlag van de Energie en Grondstoffenfabriek werken zij hierin samen om te zorgen dat deze initiatieven toe kunnen groeien van eerste concepten op laboratoriumschaal naar een volwassen schaalgrootte. Onder andere is daarbij door de waterschappen afgesproken dat zij samenwerken in groepen van waterschappen die samen een bepaalde ontwikkeling adopteren en verder brengen, zogenaamde koplopergroepen.

De productie van een plasticvervanger uit zuiveringslib is een van deze initiatieven die door de waterschappen zijn geïdentificeerd als een kansrijke ontwikkeling. In het PHARIO-project (2015 tot 2017) zijn daarvoor al succesvolle pilotproeven uitgevoerd. Ook was de techniek al op pilotschaal getest op industrieel afvalwater door Paques. In vervolg hierop hebben vijf waterschappen, STOWA, HVC en Paques Biomaterials in 2020 een samenwerkingsovereenkomst getekend om in het PHA2USE-project deze ontwikkeling verder op te schalen, zowel voor reststromen van waterschappen en van de industrie. Samen vormen deze partners de koplopergroep voor deze ontwikkeling. Andere waterschappen werken op een vergelijkbare manier samen om bijvoorbeeld de terugwinning van struviet, Kaumera of cellulose uit slib op te schalen. Elke ontwikkeling vergt zijn eigen maatwerk waardoor ook de manieren van samenwerking verschillen.

De samenwerking in het PHA2USE-project is in vergelijking met andere samenwerkingsinitiatieven bijzonder omdat een groot aantal waterschappen samen en gelijkwaardig optrekken om deze ontwikkeling verder te brengen. Bovendien gebeurt dit in een nauwe en goede samenwerking met relevante stakeholders als STOWA, HVC, SNB en Aquaminerals. Tenslotte is er een goede aansluiting met onderzoek op universitair en hogeschool niveau door de samenwerking met Wetsus, TU Delft en Avans Hogeschool.

### 2.2 CALEYDA®: EEN AFBREEKBARE PLASTICVERVANGER

Zuiveringslib is de grootste afvalstroom van de rioolwaterzuivering en uit dit slib wordt nu door waterschappen eerst zoveel mogelijk energie gewonnen in de vorm van biogas. Daarna wordt het slib verbrand in speciale verbrandingsinstallaties.

Wetenschappelijk onderzoek en eerdere pilotprojecten laten zien dat het mogelijk is om met dit slib een veel hoogwaardiger product te maken, namelijk een goed afbreekbare plasticvervanger. Dat betekent niet dat er geen restproduct meer is en dat het slib niet meer verbrand

hoeft te worden. Wel kunnen waterschappen op deze manier een deel van de organische stof in het slib omzetten in een plasticvervanger en zo een product maken met een hoge toegevoegde waarde, zowel vanuit economisch oogpunt als vanuit maatschappelijk oogpunt. De productie van deze plasticvervanger is namelijk een alternatief voor de productie van biogas uit zuiveringsslib en de economische waarde van het vastleggen van koolstof in de vorm van een plasticvervanger is vele malen hoger dan wanneer het als biogas beschikbaar komt.

Op dit moment zijn er heel weinig duurzame alternatieven voor de synthetische plastics die onze maatschappij in grote hoeveelheden gebruikt. De duurzamere alternatieven die er wel zijn worden vaak gemaakt uit grondstoffen zoals suikers en palmolie die ook een voedselbron zijn. Bovendien zijn deze alternatieven ook niet onder alle omstandigheden bruikbaar. Een goed afbreekbare plasticvervanger die gemaakt kan worden uit reststromen zoals zuiveringsslib of andere industriële reststromen heeft daarom een belangrijke maatschappelijke waarde. De plasticvervanger die gemaakt kan worden uit zuiveringsslib zal niet alle plastic die nu gebruikt wordt kunnen vervangen, maar kan wel gebruikt worden in specifieke toepassingen waarbij er een groot risico is dat het plastic in het milieu terecht komt. Op deze manier kan de verspreiding van microplastics in het milieu tegengegaan worden. Er zijn namelijk steeds meer zorgen over de impact die microplastics hebben op het milieu en de gezondheid van de mens.

De technische naam voor deze plasticvervanger is polyhydroxyalkanoaat (PHA). Dit is een polyester dat de meeste bacteriën kunnen maken en die voor deze bacteriën een soort energiereserve vormt. Ook bacteriën in een rioolwaterzuivering hebben deze eigenschap. Doordat dit polymeer een universele energiereserve is voor bacteriën is het in de natuur uiterst goed afbreekbaar.

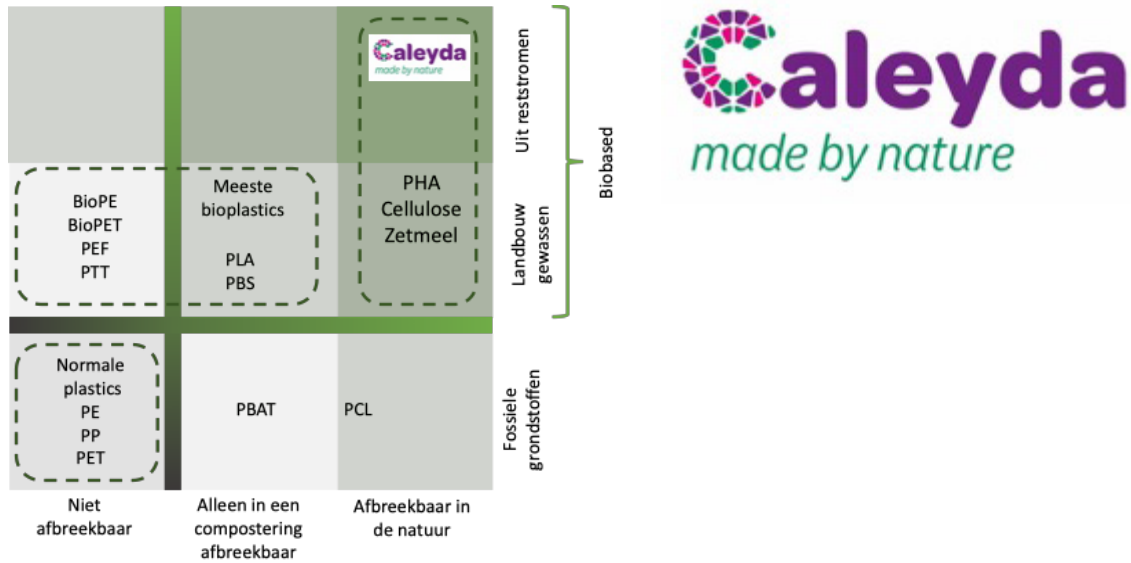
De familie van PHA-soorten is echter heel breed en binnen deze familie wordt een specifieke variant gemaakt met onderscheidende eigenschappen. Om dit te benadrukken is er gedurende het project en in samenwerking met InvestNL gewerkt aan het maken van een merknaam en een bijbehorende boodschap. Hieruit is de naam Caleyda® voortgekomen. Caleyda® is de naam voor het zuivere eindproduct na de extractie. Caleyda® is een plasticvervanger en heeft vergelijkbare eigenschappen als conventionele plastics, maar niet de nadelen. Caleyda® is namelijk uiterst goed biologisch afbreekbaar en kan daarom toegepast worden als vervanger van plastic in toepassingen waarbij er een groot risico is op verspreiding van microplastics in het milieu, bijvoorbeeld in agrarische toepassingen.

De afbreekbaarheid van Caleyda is uitzonderlijk goed in vergelijking met andere afbreekbare plastics in alle soorten omgevingen (water, bodem, compostering)<sup>1</sup>. Daarnaast wordt het materiaal ook nog eens gemaakt uit reststromen.

De waterschappen zullen zelf geen Caleyda® maken, maar zich beperken tot het maken van een gedroogd PHA-rijk halffabricaat waaruit Caleyda® kan worden geëxtraheerd. Paques Biomaterials is de beoogde partner voor deze extractie. Ook zonder extractie zijn er markten voor PHA-rijke biomassa, maar wel beperkter in omvang.

1 Voor mee achtergrond informatie, zie bijvoorbeeld dit diagram van het Duitse NOVA instituut: <https://renewable-carbon.eu/publications/product/biodegradable-polymers-in-various-environments-according-to-established-standards-and-certification-schemes/>

FIGUUR 1 CALEYDA IS AFBREEKBAAR EN GEMAAKT UIT RESTSTROMEN EN DAARDOOR DUURZAMER DAN ANDERE (BIO)PLASTICS



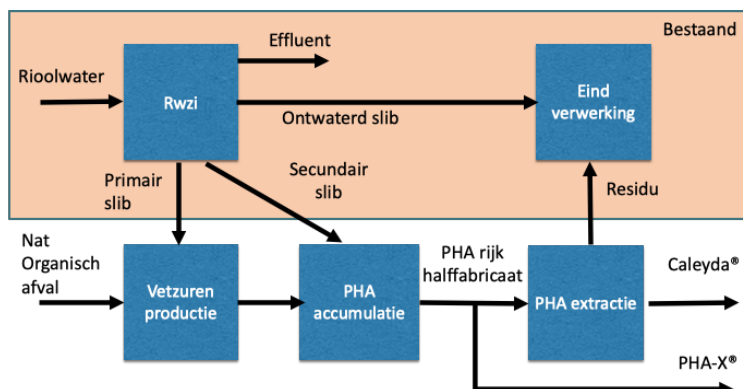
### 2.3 PRODUCTIEPROCES VOOR HET MAKEN VAN CALEYDA®

Waterschappen kunnen op twee manieren hun slib inzetten om een halffabricaat voor de productie van Caleyda® te maken:

1. Zij kunnen het secundaire slib inzetten als actieve biomassa. Hiermee kunnen vetzuurrijke stromen worden omgezet in een PHA-rijk halffabricaat. Deze aanpak wordt ook wel de “mixed culture” of “accumulatieaanpak” genoemd. In het PHA2USE-project noemen we dit ook wel de PHARIO-aanpak omdat deze aanpak centraal stond in het voorgaande PHARIO-project.
2. Zij kunnen hun primaire (en eventueel secundaire) slibstromen verzuren om zo vetzuren te maken die vervolgens als grondstof kunnen dienen voor de productie van PHA-rijk halffabricaat. Hiervoor is dan wel een actieve biomassa nodig. Dit kan secundair slib zijn (PHARIO-aanpak) of er wordt een nieuwe actieve biomassa gekweekt (selectieaanpak).

Resultaat is de productie van een PHA-rijk halffabricaat waaruit in een vervolgstap het Caleyda® kan worden geproduceerd via een extractie. Deze laatste stap zal niet door waterschappen worden gedaan. In deze samenwerking neemt Paques Biomaterials deze rol op zich. In sommige toepassingen kan het PHA-rijk halffabricaat ook zonder extractie worden toegepast. Dan wordt het product PHA-X® genoemd.

FIGUUR 2 PRODUCTIE VAN PHA UIT RWZI SLIB



In de eerste opzet hoeven de waterschappen niet per se vetzuren te maken uit eigen slib, maar zouden die vetzuren ook van andere industriële stromen kunnen komen (bepaald afvalwater of organische afval/bijproducten). Het gebruik van actieve biomassa van de waterschappen in combinatie met vetzuren uit de industrie heeft in het project in eerste instantie de focus gehad. Gedurende het project heeft de tweede aanpak (het omzetten van slib in vetzuren) steeds meer aandacht gekregen omdat hiermee een groter deel van het eigen slib omgezet kan worden. Bovendien zijn de waterschappen dan minder afhankelijk van de industrie. Een aandachtspunt is echter wel dat de stap voor het omzetten van slib in vetzuren voor zuiveringsslib ingewikkeld is, met name als er hoge omzettingen naar vetzuren nodig zijn. Hier is nog weinig ervaring mee opgedaan door de waterschappen. Hoofdstuk 5 gaat nader in op het verkrijgen van vetzuren voor de productie van PHA door de waterschappen.

## 2.4 HET PHA2USE-PROJECT

In 2020 is het PHA2USE-project gestart. In het eerdere PHARIO-project was het principe om een plasticvervanger te maken uit zuiveringsslib al aangetoond op pilotschaal en zijn enkele tientallen kilogrammen van het eindproduct geproduceerd. Dit materiaal is toen grondig gekarakteriseerd en de eigenschappen wekten de interesse van mogelijke afnemers van het materiaal. Er was echter te weinig materiaal beschikbaar om concrete toepassingen van het materiaal te kunnen ontwikkelen en testen. Daardoor kon geen zekerheid over afzet van het materiaal worden gekregen en daardoor was de stap naar een investering voor de productie op grote schaal te groot.

FIGUUR 3 PHA2USE-INSTALLATIE OP HET TERREIN VAN HVC IN DORDRECHT



PHA2USE is een samenwerking van vijf waterschappen (Brabantse Delta, Hollandse Delta, Scheldestromen, Fryslân en De Dommel), STOWA, HVC en Paques Biomaterials. Samen worden deze vijf waterschappen ook wel de PHARIO-waterschappen genoemd.

Het doel van het PHA2USE-project was om meer materiaal te produceren zodat er een impuls kon worden gegeven aan het ontwikkelen en testen van toepassingen ervan. Het idee was dat het daardoor na het project eenvoudiger zou worden om te investeren in de grootschalige productie, zowel door waterschappen als door andere private partijen.

Voor het project is op de locatie van HVC in Dordrecht een proeffabriek gebouwd waarin gedurende twee jaar een halffabricaat is geproduceerd. Uit dit halffabricaat is in een drietal campagnes de plasticvervanger Caleyda® geëxtraheerd in apparatuur bij Fraunhofer in Duitsland. Het verkregen materiaal is vervolgens aangeboden aan diverse afnemers om verschillende soorten toepassingen te testen.

Daarnaast hebben de waterschappen onderzocht hoe zij een toekomstige installatie kunnen inpassen in een bestaande rioolwaterzuivering. Voor vier locaties zijn daarvoor schetsontwerpen gemaakt. Daarnaast heeft STOWA een levenscyclusanalyse laten uitvoeren voor de productie van dit materiaal. Verder zijn door Aquaminerals initiatieven ondernomen om duidelijker te krijgen of er obstakels zijn om voor Caleyda® om een einde-afvalstatus te krijgen.

**FIGUUR 4** VAN LINKS NAAR RECHTS: PHA-RIJK HALFFABRICAAT GEPRODUCEERD IN DORDRECHT, EXTRACTIE BIJ FRAUNHOFER IN DUITSLAND EN RUW CALEYDA® NA EXTRACTIE





# 3

## TECHNISCHE RESULTATEN VAN HET PROJECT

### 3.1 INLEIDING

Dit hoofdstuk beschrijft de technische resultaten van het project. Allereerst wordt ingegaan op de resultaten van de operatie in Dordrecht waar de productie van een PHA-rijk halffabrikaat plaatsvond. Hiervoor werden verschillende vetzuurbronnen gebruikt en biomassa die afkomstig was van de rwzi Bath (secundair slib) of in de installatie werd opgekweekt (selectieaanpak). Het tweede deel van het hoofdstuk beschrijft de resultaten van de extractie van PHA uit dit halffabrikaat. Dit materiaal is dan Caleyda<sup>®</sup>. Voor sommige toepassingen is pelletisering van het Caleyda<sup>®</sup> nodig en de ervaringen hiermee worden ook besproken.

### 3.2 PRODUCTIE VAN PHA-RIJK HALFFABRICAAT

#### 3.2.1 VOORBEREIDENDE TESTEN

Bij de start van het PHA2USE-project (najaar 2020) is er op kleinere schaal een korte pilot proef georganiseerd en uitgevoerd op de pilotlocatie voor afvalwaterzuivering in Leeuwarden, via een sterke en intensieve samenwerking tussen Paques Biomaterials, Wetterskip Fryslân, Waterschap Brabantse Delta en Wetsus. Deze pilot proef maakte het mogelijk om een aantal principes op grotere schaal te testen om extra zekerheid te krijgen voor enkele ontwerp vragen van de te realiseren installatie voor de productie van PHA-rijk halffabrikaat in Dordrecht. Bovendien maakte dit het mogelijk om grotere hoeveelheden PHA-rijk halffabrikaat te verkrijgen om een extractieproef bij Fraunhofer uit te voeren, omdat de eerdere voorraad van Paques Biomaterials en PHARIO niet voldoende was voor dit doel. Deze voorbereidende extractieproef was nodig om de extractie mogelijkheden bij Fraunhofer te kunnen onderzoeken en om vroegtijdig geëxtraheerd materiaal beschikbaar te krijgen voor het ontwikkelen van toepassingen ervan.

Deze pilotproef omvatte het bedienen van een 4 m<sup>3</sup> PHA-accumulatie bioreactor gevoed met synthetisch medium met azijnzuur en propionzuur voor de PHA-accumulatie in secundair slib van de rwzi Bath. Het proces imiteerde het werk dat eerder op kleinere pilotschaal bij Wetsus was gedaan, met de toevoeging van het gebruik van een industriële decanter centrifuge en een droger om gedurende 3 weken de benodigde productie van PHA-rijk halffabrikaat te bereiken. Uiteindelijk werd ongeveer 24 kg PHA in gestabiliseerd en gedroogd PHA-rijk halffabrikaat geproduceerd voor de extractieproef. Als bonus van deze pilotproeven werd cruciale informatie verzameld over de pilotregeling, materialen, pompen en de dimensionering van de decanter centrifuge en de droger, waardoor de risico's bij de realisatie van de PHA2USE demo-installatie aanzienlijk werden verkleind.

FIGUUR 5 IMPRESSIE VAN DE TIJDELIJKE PRODUCTIE VAN PHA-RIJK HALFFABRICAAT OP DE RWZI LEEUWARDEN

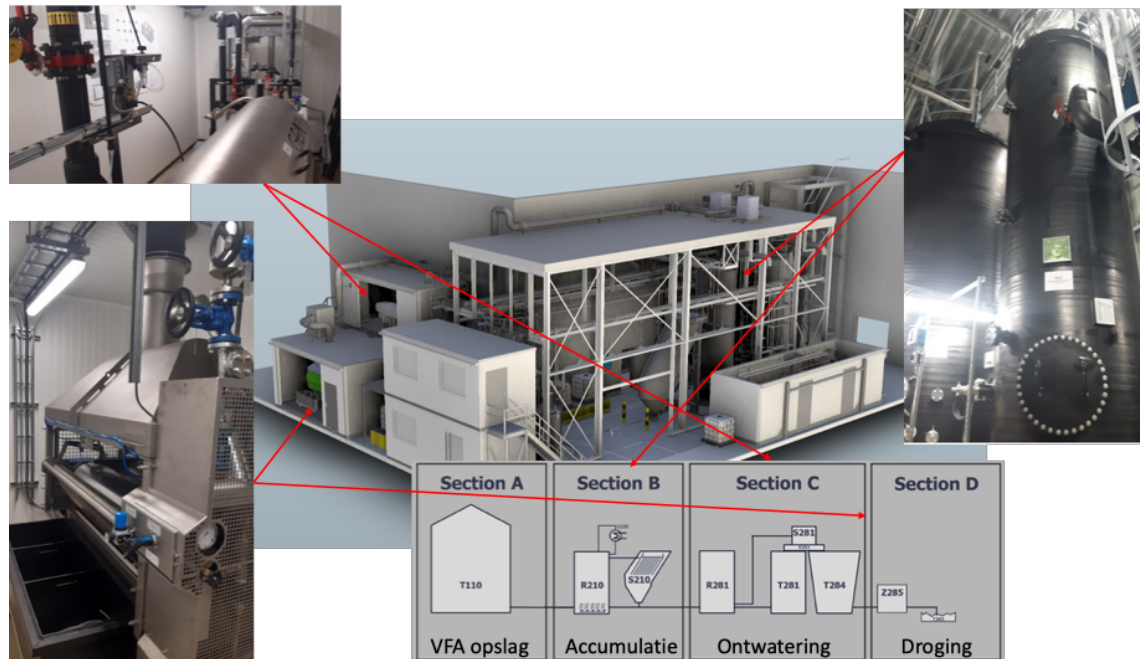


### 3.2.2 KORTE TECHNISCHE BESCHRIJVING VAN DE PHA2USE DEMO-INSTALLATIE IN DORDRECHT

De PHA2USE demo-installatie is gebouwd op het terrein van de silbverbrandingsinstallatie van HVC in Dordrecht en de installatie is ruim twee jaar in bedrijf geweest. De installatie is ondergebracht in een nieuw geplaatste tijdelijke hal, in combinatie met een aantal kiosken (o.a. kantoor en lab). In grote lijnen behelst de installatie de volgende onderdelen:

- Een opslagtank van 50 m<sup>3</sup> voor ontvangst van vetzuur (VFA)-houdende stromen per vrachtwagen;
- Een 10 m<sup>3</sup> beluchte bioreactor ten behoeve van productie van PHA-rijk halffabrikaat;
- Een platenafscheider ten behoeve van het afscheiden door bezinking van het geproduceerde PHA-rijk halffabrikaat;
- Een 12 m<sup>3</sup> voedingstank voor de decanter centrifuge;
- Een decanter centrifuge voor ontwatering van het PHA-rijk halffabrikaat (zonder polymeedosering);
- Een stoom gevoede droger ten behoeve van het drogen van het ontwaterde PHA-rijk halffabrikaat (het halffabrikaat voor Caleyda®).

FIGUUR 6 IMPRESSIE VAN DE PHA2USE-INSTALLATIE IN DORDRECHT EN DE BELANGRIJKSTE PROCESONDERDELEN



De installatie is in hoge mate geautomatiseerd en beveiligd en voorzien van een aantal softwareprogramma's die door de twee operators in dagdienst kunnen worden bediend ten behoeve van de diverse procesonderdelen:

- Menging, pH- en temperatuurregeling en eventueel nutriëntendosering in de opslagtank voor VFA houdende stromen;
- Programma's voor "Directe accumulatie" en "Selectie" ten behoeve van operatie van de bioreactor/PHA-productie;
- Een programma voor het aanzuren en ontwateren van het PHA-rijk halffabricaat, in combinatie met mogelijke wasstappen;
- Een programma voor het voeden van ontwaterd PHA-rijk halffabricaat aan de droger.

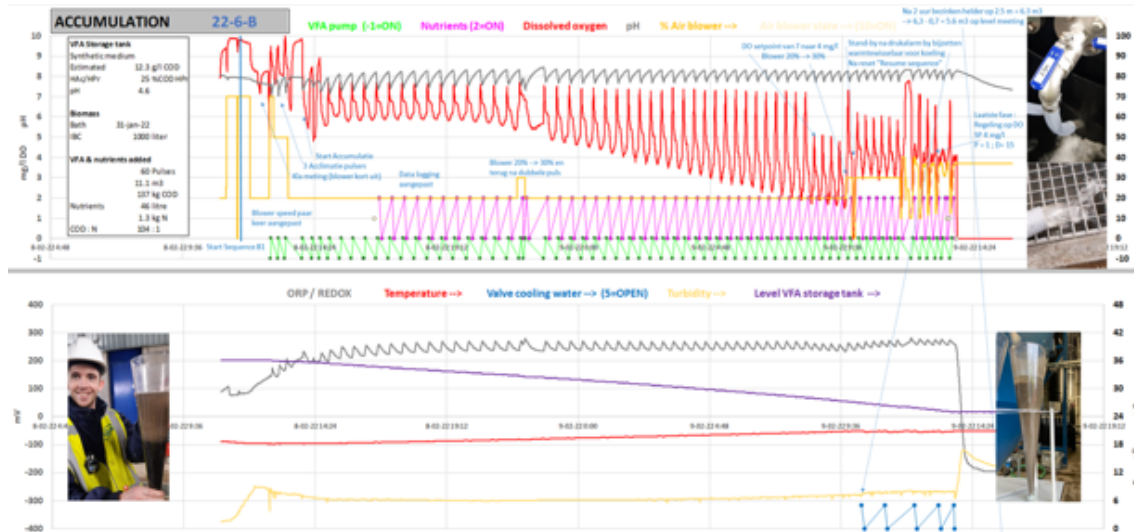
Het gedroogde PHA-rijk halffabricaat wordt in de droger opgevangen in plastic zakken en daarna per batch overgebracht in goed afsluitbare plastic 200 liter vaten.

Geproduceerd afvalwater werd via een effluenttank met dompelpomp richting de afvalwaterput van HVC gepompt en op deze wijze verder afgevoerd naar de nabijgelegen waterzuivering van WSHD.

De operators voerden on-site een aantal analyses uit volgens een analyseschema en tevens werden monsters verzameld ten behoeve van analyses op verschillende locaties (Externe labs, Avans Hoge school, TU Delft, Paques, Paques Biomaterials, Wetsus, Promiko)

De meest relevante parameters die online gemeten en geregistreerd werden zijn: opgelost zuurstof, pH, temperatuur, redox, niveau in de VFA-tank, VFA pomp aan/uit, nutriëntenpomp aan/uit, blower aan/uit, blower speed. Buiten de online data hadden de operators een checklist en analyse-schema voor veldmetingen, zoals bijvoorbeeld het niveau in de nutriënten-IBC, drukmetingen, CZV-metingen, TSS-metingen, N-metingen en Imhoff(slibvolume) metingen.

FIGUUR 7 VOORBEELD VAN DE ONLINE GEMETEN PARAMETERS TIJDENS EEN ACCUMULATIE



### 3.2.3 BESCHRIJVING UITGEVOERDE TESTEN

In het project is gebruik gemaakt van verschillende VFA-rijke voedingsstromen. Nadat tijdens de ingebruikname van de installatie een aantal accumulaties succesvol waren uitgevoerd met een synthetisch medium (een mengsel van azijnzuur en propionzuur) zijn achtereenvolgens de volgende stromen ingezet:

- Afvalwater van een snoepjesfabriek;
- Afvalwater van een papierfabriek;
- Weipermeaat;
- Centraat van verzuurd primair slib van de rwzi Oldenzaal.

Voor de omzetting van de vetzuren in deze stromen naar PHA zijn in het project twee verschillende methoden gebruikt namelijk “Directe Accumulatie” en “Selectie”. In dit openbare rapport worden alleen de resultaten van de “Directe Accumulatie” besproken. De resultaten van de “Selectie” periode zijn namelijk IP gevoelig en kunnen daardoor niet in dit openbare rapport worden gedeeld. Paragraaf 6.3 gaat in algemenere zin in op de verschillen tussen de accumulatie aanpak en de selectie aanpak.

De volgende paragrafen beschrijven eerst de wijze van bedrijfsvoering voor de directe accumulatie en daarna de eigenschappen van de verschillende vetzuurbronnen.

#### DIRECTE ACCUMULATIE

De installatie is met name ontworpen voor deze route, waarbij het uitgangspunt is dat gebruik wordt gemaakt van de PHA accumulerende capaciteit van secundair slib afkomstig van communale afvalwaterzuiveringen. Deze aanpak is eerder aangetoond in het PHARIO-project en wordt daarom vaak ook de PHARIO-aanpak genoemd. In deze wijze van opereren worden twee accumulaties per week uitgevoerd via een batchgewijze aanpak. Voor elke accumulatie werd secundair slib van de rwzi Bath (4-6% droge stof) gebruikt die op maandagen in IBC's werd aangeleverd.

Bij de start van een accumulatie werd het secundair slib geacclimatiseerd door rest CZV en ammonium weg te beluchten en enkele korte voedingspulsen te geven. Hierna volgde de accumulatie door VFA rijk water via pulsen te voeden aan het slib (feed on demand).

Na afloop van een accumulatie volgt bezinking en aanzuren van het verkregen slib. Het aangezuurde slib werd tenslotte ontwaterd en gedroogd.

Per accumulatie (batch) wordt typisch rond de 100 – 150 kg CZV verbruikt en wordt aan het eind van de accumulatie zo'n 60 – 120 kg VSS aan PHA-rijk halffabricaat verwacht met ca. 0.35 – 0.40 gPHA/gVSS (35-40%PHA/VSS).

#### **AFVALWATER VAN EEN SNOEPJESFABRIEK**

Het project startte met het gebruik van een suikerhoudende afvalwaterstroom van een snoepjesfabriek. Eerder in het PHARIO-project zijn suikerhoudende afvalwaterstromen afkomstig van deze fabriek (~45 g/l CZV, CZV:N ~100:1, CZV:P ~1600:1), na verzuring, succesvol als vetzuurbron gebruikt voor directe accumulaties en deze afvalwaterstroom werd binnen het PHA2USE-project geselecteerd om als vetzuurbron te worden ingezet voor de eerste accumulaties in Dordrecht (2022 week 18 t/m 27). Er zijn twee batches gebruikt met respectievelijk 69 g/l CZV (30 m<sup>3</sup>) en 30 g/l CZV (10 m<sup>3</sup>), samen circa 2400 kg CZV.

#### **AFVALWATER VAN EEN PAPIERFABRIEK**

Een tweede afvalwaterstroom die is gebruikt voor zowel directe accumulaties als voor de selectie-route is het afvalwater van een papierfabriek. Dit afvalwater bevat rond 6-9 g/l CZV (CZV:N > 2500 :1 en CZV:P > 2500 :1) met een voorverzuringgraad van ca. 40-50%, waarvan het grootste deel melkzuur (ca. 3 g/l CZV melkzuur). Verder bevat dit afvalwater een hoog calciumgehalte van ca. 600 -1000 mg/l Ca. In totaal zijn in 2022 en 2023 58 vrachtwagens geleverd met een inhoud van 20 – 30 m<sup>3</sup> ofwel ca. 1500 m<sup>3</sup> afvalwater met naar schatting 12000 kg CZV.

#### **Weipermeaat**

Een derde stroom die is gebruikt als bron voor vetzuren is wei-permeaat afkomstig van geitenkaasproductie. Deze zeer geconcentreerde stroom bevat ca. 160 g/l CZV, met name lactose (CZV:N ~130:1 en CZV:P ~140:1).

Totaal is in 2023 en 2024 eerst 9 m<sup>3</sup> geleverd in IBC's en vervolgens zijn per vrachtwagen 5 leveringen/bijvullingen van in totaal ~130 m<sup>3</sup> gebracht en gevoed vanuit een trailer die bij de demoplant was geplaatst. Totaal is ca. 140 m<sup>3</sup> gebruikt ofwel naar schatting 21000 kg CZV.

#### **CENTRAAT VAN VERZUURD PRIMAIR SLIB UIT OLDENZAAL**

Aan het eind van het PHA2USE-project zijn in samenwerking met Waterschap Vechtstromen en Royal HaskoningDHV op de RWZI Oldenzaal grootschalige testen uitgevoerd met verzuring van primair slib (zie ook paragraaf 5.3). Vetzuurhoudend centraat afkomstig van de ontwatering na verzuring van het primair slib is per vrachtwagen naar Dordrecht gebracht ten behoeve van directe accumulaties. Totaal zijn 11 vrachtwagens geleverd afkomstig van 3 verschillende batches. Het totale volume bedroeg ca. 280 m<sup>3</sup> centraat met ca. 4-5 g/l CZV opgelost (en nog ca. 1 g/l solids CZV) en een hoge voorverzuringgraad (> 80%). De nutriënten verhoudingen bedroegen: CZV opgelost:N 20-40 :1 en CVZ opgelost:P 300-1300 : 1

### **3.2.4 RESULTATEN**

#### **3.2.4.1 VERZURING VAN DE RESTSTROMEN**

Voor het ontwerp van de PHA2USE demo-installatie in Dordrecht was het uitgangspunt dat de vetzuurstromen zover als mogelijk voorverzuurd binnen zouden komen en dat de 50 m<sup>3</sup> ontvangsttank zou dienen als opslag en buffering ten behoeve de accumulaties. Deze tank

was wel voorzien van een menger en pH regeling met natronloog voor eventuele nareacties. De tank was niet voorzien van verwarming. In de praktijk is het niet mogelijk gebleken de geselecteerde stromen voorverzuurd binnen te krijgen en heeft een groot deel van de verzuuring plaats moeten vinden in de opslagtank. Dit heeft wat consequenties gehad, zoals hieronder beschreven wordt voor de diverse stromen. Uiteindelijk is er in het tweede jaar van het project een verwarmingssysteem geïnstalleerd en de mogelijkheid om te voeden vanuit een trailer waardoor de ontvangttank beter als verzuringsreactor kon worden gebruikt.

#### **AFVALWATER SNOEPJESFABRIEK**

In april 2022 werd de PHA2USE demo-installatie opgeleverd en daarna vonden eerst een aantal testruns plaats met een synthetisch vetzuurmengsel. In de periode van 29 april 2022 tot en met september 2022 zijn testen uitgevoerd met het suikerwater van de snoepjesfabriek. De eerste batch had na verdunning met proceswater een CZV-gehalte van 57 g/l en na 3 weken bleek 60% van het opgeloste CZV omgezet te zijn in melkzuur bij een pH van 5-5.5. Slechts 20% van het opgeloste CZV was beschikbaar als vetzuren zoals azijnzuur, propionzuur en boterzuur. Verdunning van het water tot 25 g/l en daarna naar 12,5 g/l (nog steeds bij pH 5.5) veranderde niets aan deze samenstelling en op deze manier bleek het niet mogelijk het melkzuur om te zetten.

Eind juni is een tweede vracht afvalwater geleverd en deze is na levering meteen verdund naar 12,5 g/l met een pH van 5,2. Na een week begon de pH te stijgen naar boven de 6,5, hetgeen indicatief is voor de omzetting van melkzuur in de andere vetzuren. In deze laatste periode werd ook 20% van de CZV in de vorm van ethanol gemeten.

Vanwege de moeilijke omzetting naar vetzuren voor dit water is dit water verder niet meer gebruikt in het project en is overgestapt op al deels verzuurd afvalwater van een papierfabriek. Direct na de testen met dit afvalwater zijn een aantal batches uitgevoerd met synthetische vetzuur mengsels die wel betere accumulaties lieten zien. Dit wijst erop dat een goede vetzuursamenstelling van belang is voor een goede productie.

#### **AFVALWATER PAPIERFABRIEK**

Met de eerste leveringen van afvalwater van de papierfabriek zijn vier directe accumulaties uitgevoerd en vervolgens is van september – november 2022 drie maanden Selectie gedraaid. De combinatie van een gewenste CZV-belasting en minimale hydraulische verblijftijd in de PHA-reactor met de relatief lage CZV-concentratie in het afvalwater, vergde de levering van twee vrachtwagens per week. In de maand november werd dit opgevoerd naar drie vrachtwagens per week. Bij ca. twee vrachtwagens per week is de hydraulische verblijftijd in de opslagtank zo'n 7 dagen. Bij drie vrachtwagens in de week reduceerde dit tot ca. 4-5 dagen. Elke keer na levering van een nieuwe vrachtwagen afvalwater daalde de pH in eerste instantie vrij snel van pH 6-6.5 naar pH 5 – 5.5, waarna de pH in de opslagtank weer langzaam begon te stijgen (zonder toevoeging van loog). Na elke levering werd ook een kleine hoeveelheid nutriënten in de opslagtank gedoseerd om de verzuuring te stimuleren.

Met betrekking tot vetzuurconcentraties in de opslagtank kan het volgende worden geconcludeerd:

- Na elke nieuwe levering was er een piek in melkzuur concentratie (3000 – 5000 mg/l CZV in de vorm van melkzuur).
- Bij een hydraulische verblijftijd van 7 dagen in de opslagtank reageert het melkzuur tussen twee leveringen weg en zijn de “eind” vetzuurconcentraties van de langere

vetzuren (boterzuur en valeriaanzuur) duidelijk hoger dan bij een hydraulische verblijftijd van 5 dagen in de opslagtank.

- Bij een hydraulische verblijftijd van 7 dagen in de opslagtank is de gemiddelde verzuringgraad duidelijk hoger dan bij een hydraulische verblijftijd van 5 dagen in de opslagtank.

Na een selectie periode werden vanaf half januari 2023 tot en met begin september 2023 weer directe accumulaties uitgevoerd met het afvalwater van de papierfabriek. In eerste instantie werd maar één accumulatie per week uitgevoerd, omdat het aantal geleverde vrachtwagens gelimiteerd werd tot één keer per week. Dit werd gedaan om voldoende verzuringstijd in de opslagtank te geven om de voorverzuringgraad zo hoog mogelijk te krijgen en ook al het melkzuur weg te laten reageren. Vanaf maart 2023 werd besloten om de ca. 7 g/l CZV-concentratie in het water aan te vullen met 5 g/l synthetische vetzuren (azijnzuur en propionzuur), zodat ca. 12 g/l CZV beschikbaar was ten behoeve van accumulaties. Dit had twee voordelen, namelijk dat er met één vracht in de week toch twee accumulaties konden worden uitgevoerd en dat de verhouding CZV : calcium werd verhoogd, waardoor het anorganische gehalte in het PHA-rijke halffabricaat werd verlaagd. Tijdens het toevoegen van de synthetische vetzuren werd natronloog gedoseerd om de pH boven de 5 te houden, maar regelmatig schoot de pH door naar 4.5, waardoor verdere verzuring en omzetting van melkzuur werden afgeremd.

Het vetzuur productspectrum dat op deze wijze werd bereikt bij een hoog percentage verzuring van het opgeloste CZV resulteerde in een samenstelling met zowel azijnzuur (C2), propionzuur (C3), boterzuur (C4) en valeriaanzuur (C5), waarbij de verhouding oneven vetzuren (C3 en C5) en even vetzuren (C2 en C4) ongeveer gelijk was verdeeld.

### **WEIPERMEAAT**

Het weipermeaat bevatte een hele hoge concentratie CZV, zo'n 160 g/l en was niet voorverzuurd. Het bevat lactose dat eerst verzuurd dient te worden. Als het niet verdund zou worden zou de verzuring vrij snel stoppen, omdat vetzuurconcentraties remmend gaan worden. Daarom werd het weipermeaat uiteindelijk standaard ca. 10 keer verdund, zodat de concentratie CZV in de tank rond de 14 g/l kwam te liggen. Initieel werd batchgewijs een aantal keer een aantal IBC's in de tank gebracht en verdund met koud water. Mede door de lage temperatuur duurt het dan erg lang voordat de verzuring compleet is.

De samenstelling van het verzuurde weipermeaat begin november voor de accumulaties in week 45 t/m 47 was als volgt: melkzuur 0, azijnzuur 1600, propionzuur 3600, boterzuur 3000 en valeriaanzuur 4200 mg/l CZV, totaal vetzuren 12400 mg/l CZV.

In november 2023 werd een extra verwarmingssysteem gebouwd om de opslagtank te kunnen verwarmen en werden aanpassingen gedaan, zodat i.p.v. af en toe handmatig een IBC weipermeaat over te pompen het weipermeaat nu met een pomp in kleine hoeveelheden uit een buiten opgestelde trailer automatisch, verdeeld over de dag, gedoseerd en 1 op 10 verdund kon worden.

Na de hierboven weergegeven accumulaties werden vanaf eind november accumulaties via de selectiemethode gedraaid, waardoor ook het verbruik uit de tank gelijkmatig over de dag verliep en het niveau in de tank constant kon worden gehouden op ca. 40 m<sup>3</sup> volume. De hydraulische verblijftijd was tijdens deze periode 6 – 7 dagen.

Een lager vloeistofniveau in de tank (midden januari tot midden februari en laatste twee weken maart) liet een duidelijk effect zien op het vetzuurproductspectrum. Door een (te) korte hydraulische verblijftijd in deze periode vond er opbouw van melkzuur plaats. De vetzuursamenstelling bestond uit azijnzuur (C2), propionzuur (C3), boterzuur (C4), en valeriaanzuur (C5), waarbij het aandeel even vetzuren (C2 en C4) op CZV-basis duidelijk hoger is dan die van de oneven vetzuren (C3 en C5). Vanaf begin maart loopt ook de concentratie hexaanzuur (C6) op, mogelijk door ingroei van bacteriën die baat hebben bij een iets hogere pH.

De som van de gemeten melkzuur- en VFA-concentraties in CZV uitgedrukt liggen in het middendeel van deze periode een stuk lager dan de on-site gemeten opgeloste CZV-concentraties. Dit zou kunnen duiden op een niet volledige verzuring of een niet geanalyseerd andere product. Ethanol werd in een check alleen in een lage concentratie gemeten en kon dit gat niet verklaren.

#### **CENTRAAT VAN VERZUURD PRIMAIR SLIB**

Deze stroom was al verzuurd bij binnenkomst. Voor meer informatie over de productie en samenstelling zie paragraaf 5.3.3.

#### **ERVARINGEN MET DE ANALYSE VAN VETZUREN**

In het twee jaar durende project zijn vetzuuranalyses door verschillende partijen uitgevoerd, namelijk door TU Delft, Avans Hogeschool Breda, Lab Paques Balk en Eurofins. Resultaten kwamen niet altijd precies overeen en de som van het totaal CZV de het type vetzuren lag niet altijd in lijn der verwachting op basis van gemeten opgeloste CZV-concentraties in de tank. De in dit rapport gerapporteerde getallen geven echter een goed beeld van de trend in de tijd en verhouding tussen verschillende vetzuren.

#### **3.2.4.2 RESULTATEN DIRECTE ACCUMULATIE (PHARIO-AANPAK)**

Tijdens in bedrijfstelling en proefbedrijf van de PHA2USE demo-installatie werden meerdere accumulaties uitgevoerd op synthetisch medium (75% azijnzuur\_CZV : 25% propionzuur\_CZV) die goed verliepen en vergelijkbare resultaten opleverden met de testen die in Q4 2020 in Leeuwarden werden uitgevoerd met de 4 m<sup>3</sup> bioreactor. In het PHA-rijke halffabricaat werden gehalten van 35 – 40% PHA/VSS gerealiseerd in accumulaties van ca. 24 uur bij een CZV : N 100 : 1 nutriëntendosering.

In week 18 t/m 28 van 2022 werden accumulaties uitgevoerd met het water van de snoepjesfabriek. De resultaten van die accumulaties stelden wat teleur. Slechts een drietal keer werden gehalten rond de 30% PHA/VSS (droog product) of net daarboven gehaald, maar in het grootste deel van die accumulaties werden (te) lage eind PHA-gehalten bereikt.

Oorzaken voor de achterblijvende resultaten moeten worden gezocht in een combinatie van de volgende zaken:

- Onvolledige verzuring van het suikerwater;
- Een erg hoog aandeel aan melkzuur;
- Door de aanwezigheid van suiker en/of melkzuur mogelijk een andere opgelost zuurstof profiel, die wellicht verkeerd geïnterpreteerd is, waardoor er minder pulsen per accumulatie zijn gegeven dan mogelijk was;
- Een te hoog opgelost zuurstof setpoint, waardoor de volgende puls later komt dan gewenst;
- Vervuiling van de sensor voor opgelost zuurstof (niet vaak genoeg schoongemaakt);



- Mogelijk te weinig nutriëntendosering (CZV : N 200 : 1 );
- Vaak een vroegtijdige beëindiging van de accumulatie door een schuim- of niveaualarm (Hierdoor ofwel een aantal uur beluchting op minimaal niveau ofwel een aantal uren anaeroob voor verdere verwerking van de batch).

De problemen met ongewenst vroegtijdige beëindiging van accumulaties door alarmen werd veroorzaakt door de aanwezigheid van veel haren in het Bath secundair slib dat aan het begin van een accumulatie wordt toegevoerd aan de bioreactor. De haren verstopten de sproeier en warmtewisselaar en verhoogden de drukval in de sproeileiding, waardoor alarmen door schuimvorming en hoge druk werden veroorzaakt. Uiteindelijk werd een redelijk werkende zuigkorf gevonden die haren grotendeels tegenhield bij het overpompen van het Bath-slib uit de IBC in de bioreactor en ook werd in de software gewijzigd dat antischuim automatisch werd gedoseerd bij een schuimalarm, waardoor de accumulatie in dat geval niet meer werd gestopt. Tenslotte werd een extra open/dicht bypass klep geïnstalleerd bij de warmtewisselaar, die bij hoge druk door verstopping van de warmtewisselaar open werd gestuurd, zodat de sproeileiding verder in bedrijf kon blijven.

In week 29, 30, 31 en 34 werden zes accumulaties op synthetisch medium uitgevoerd, waarbij het puls setpoint voor opgelost zuurstof handmatig werd verlaagd gedurende accumulaties (toenemende snelheden door toenemende temperatuur en wat groei). Deze accumulaties gaven allen, ondanks overvoeding van vetzuren aan het begin van drie van deze accumulaties, een mooi PHA-eindgehalte.

In week 32, 33 en 35 werden de eerste vier accumulaties op water van de papierfabriek uitgevoerd. De accumulaties van week 32 en 33 leverden goede resultaten op, ondanks het feit dat tijdens de accumulatie van week 33 een vrachtwagen nog niet volledig verzuurd water werd gelost in de VFA-opslagtank (ongewenste timing in logistiek). De beide accumulaties in week 35 verliepen technisch en operationeel goed, maar hadden toch erg lage PHA-gehalten aan het eind. Ook hier werd tijdens de eerste accumulatie een vrachtwagen gelost en werd door de papierfabriek ook problemen met een zetmeellekkage gerapporteerd. Het slib in deze accumulaties bezonk ook veel slechter en zag er veel lichter uit.

Al met al vielen in deze eerste accumulatieperiode van vier maanden de resultaten tegen, met name het gehalte PHA in het PHA-rijke halffabricaat. De resultaten onderstrepen het belang van een stabiele en zo ver mogelijk voorverzuurde VFA voedingsstroom. Tegelijk werd duidelijk dat de installatie beperkingen had om stromen in te nemen waarbij nog veel voorverzuring nodig was. De opslagtank was wel bruikbaar om enigszins te verzuren maar was toch vooral ontworpen als opslagtank. Daarna kwamen in deze periode diverse onverwachte kinderziekten (bv haren in het slib, alarmeringen die leidden tot vroegtijdig afbreken van accumulaties).

In de tweede (dec 2022- nov 22) en derde (apr 2023-jun 2023) accumulatieperiodes zijn routinematig meer dan 100 accumulaties uitgevoerd. In de tweede periode werden als vetzuurvoeding achtereenvolgens synthetisch medium, papierfabriek water, papierfabriek water aangevuld met synthetische vetzuren, synthetisch medium en weipermeaat gebruikt. In de derde accumulatieperiode werd begonnen met weipermeaat en werd vervolgens het concentraat van verzuurd primair slib uit Oldenzaal gebruikt. Tenslotte werden aan het eind nog een aantal laatste accumulaties met synthetisch medium uitgevoerd.

De tabel hieronder geeft een overzicht van de productiecijfers voor de accumulatieaanpak. De resultaten laten zien dat PHA-gehaltenes in het droog product van 35% PHA/VSS voor alle geteste stromen haalbaar zijn. Alleen in het laatste deel van de accumulaties op papierfabriek water (aangevuld met synthetische vetzuren) werd dit niet gehaald. Ook voor vetzuren uit primair slib werd gemiddeld een iets lager resultaat gehaald. Dit gemiddelde werd vooral naar beneden getrokken door twee accumulaties met een duidelijk lager PHA%.

**TABEL 1** OVERZICHT VAN DE HOEVEELHEDEN PHA-RIJKE BIOMASSA EN PHA GEPRODUCEERD MET ACCUMULATIE AANPAK BIJ DE VERSCHILLENDE SOORTEN TOEGEPAST SUBSTRAAT GEDURENDE HET PHA2USE-PROJECT

	Aantal productie batches	Halffabricaat (kg)	PHA in halffabricaat (kg)	PHA-gehalte (% van TS)	PHA-gehalte (% van VSS)
<b>PHARIO accumulatie</b> (secundair slib rwzi Bath als actieve biomassa)					
Synthetische vetzuren	31	1405	427	30	35
Suikerwater	15	660	99	15	22
Papierfabriek water	56	2091	471	23	34
Weipermeaat	6	224	75	33	36
Vetzuren uit primair slib	7	466	109	23	29
Totaal	115	4846	1181	24	33

Hoewel 35% PHA/VSS voldoende is laten resultaten op laboratorium schaal zien dat hogere concentraties mogelijk moeten zijn. Een mogelijke verklaring voor de lagere accumulatie-percentages is gelegen in de combinatie van accumulatie-tijd en temperatuur. De bioreactor in de PHA2USE demo-installatie kon niet worden verwarmd, maar wel worden gekoeld. De koeling is aan het eind van accumulaties soms nodig, omdat het accumulatieproces zelf warmte produceert. Vooral bij geconcentreerdere voedingsstromen kan de temperatuur dan oplopen tot boven de 35 °C graden, daar waar in onderzoekswerk in het verleden 25 °C standaard was. De begintemperatuur van de accumulatie is echter ook belangrijk omdat deze mede de start-activiteit van het slib bepaalt. Als de bioreactor in de winter wordt gevuld met kouder water, betekent dit dat de startactiviteit lager is en er een langere accumulatie-tijd nodig is om hetzelfde PHA-gehalte te bereiken.

Vanaf week 8, 2023 is daarom vanwege erg lage starttemperaturen de accumulatie-tijd verlengd van 22 uur naar 33 uur. Deze langere accumulatie-tijd is later in de zomerperiode aangehouden, omdat er van uit gegaan werd dat een langere accumulatie-tijd tot hogere PHA-gehaltenes leidt. In de praktijk was het lastig om de evolutie van het PHA-gehalte in de tijd te volgen omdat bij een batch slechts vier monsters genomen werden, drie gedurende de beginfase van een accumulatie en een laatste vlak voor beëindiging van de accumulatie.

Om het effect van de accumulatie tijd te onderzoeken is daarom in een accumulatie op synthetische vetzuren de accumulatie-tijd naar 33 uur gebracht en werden om de paar uur monsters genomen om het PHA-gehalte in de tijd beter te monitoren. Er werd een optimum PHA-gehalte gevonden van 36% PHA/VSS na slechts 18 uur accumuleren, terwijl aan het eind van de accumulatie slechts 19-20% PHA/VSS gemeten werd in het gedroogde eindproduct.

De combinatie van hogere temperaturen en de langere accumulatie-tijd in de tweede helft van de accumulatie-periode op papierfabriek water kan heel goed hey wat lagere PHA-gehalte verklaren, wanneer inderdaad “over het optimum heen” is geaccumuleerd.

Het moment van optimum PHA-gehalte is behalve temperatuur afhankelijk mogelijk ook afhankelijk van de beschikbare N en P tijdens de accumulatie. De meeste accumulaties

werden uitgevoerd met CZV : N 100 : 1 en CZV : P 2000:1. Er wordt dus maar weinig N en P gedoseerd, waardoor groei wordt beperkt. Er is echter al een hoeveelheid P al aanwezig is in het Bathslib dat aan het begin van de accumulaties dat voor een deel ook biobeschikbaar is en significant is ten opzichte van de tijdens de accumulatie gedoseerde hoeveelheid. Er zou dus aan het begin van een accumulatie een “overmaat” biobeschikbare P kunnen zijn die ergens tijdens de accumulatie uitgeput raakt. Dit zou ook voor ijzer kunnen gelden, omdat het Bathslib ijzerfosfaat bevat.

In de beginperiode (week 4 t/m 11 van 2023) werd het papierfabriekwater direct zonder toevoeging van extra vetzuren gebruikt voor accumulaties. Door de hoge verhouding calcium:CZV in dat afvalwater ontstaat tijdens de accumulatie een neerslag van calciumcarbonaat. Dit calciumcarbonaat in het PHA-rijk halffabricaat wordt vervolgens tijdens het aanzuren met zuur na accumulatie en voor de ontwatering omgezet naar calciumsulfaat. Hierdoor neemt het anorganische gehalte in het PHA-rijke halffabricaat toe. In de genoemde periode liep het percentage anorganische stof zelfs op tot 50% of hoger, waardoor ook bij 40% PHA/VSS het PHA-gehalte op droge stof basis slechts 20% bedraagt. Dit is niet acceptabel als voeding voor de latere downstream PHA-extractie. Het erg hoge gehalte aan anorganisch materiaal in het gedroogde eindproduct werd nog eens versterkt doordat de centrifuge selectief meer zwaar materiaal afcentrifugeerde en een deel van het materiaal met een hoger VSS-gehalte verloren ging met het centraat. Om het gehalte anorganisch materiaal in de PHA-rijk halffabricaat terug te brengen werd daarom vanaf week 12 ongeveer 5 g/l CZV synthetische vetzuren toegevoegd aan het papierfabriekwater, om de verhouding calcium:CZV te verlagen. Dit had tevens als voordeel dat er met één vrachtwagen per week toch twee accumulaties gedaan konden worden.

### MASSABALANSEN

Met behulp van de beschikbare analyses zijn massabalansen opgesteld over de verschillende accumulaties om een indruk te krijgen van de verliezen tijdens het proces van accumulatie tot aan droging.

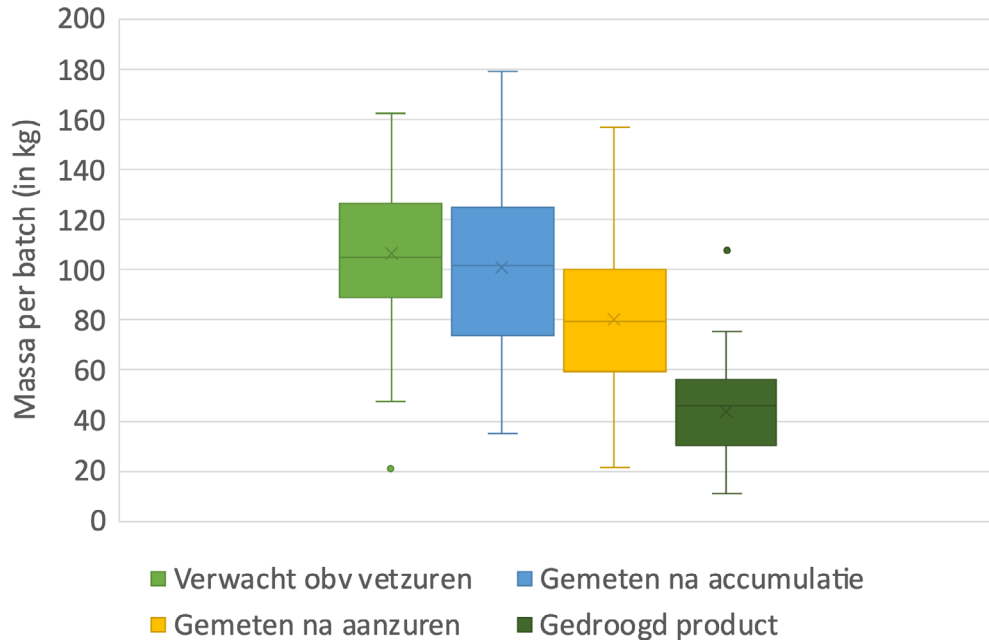
Typisch werd voor een accumulatie 500 liter ingedikte Bath slib (~5% DS) aan de bioreactor toegevoerd (~25 kg vaste stof). Soms was er echter ook nog wat (ongewenste) rest vastestof uit de vorige accumulatie in de bioreactor aanwezig waardoor er meestal gestart werd met een totale TSS hoeveelheid van ca. 40 kg. Typisch werd tussen 100 en 200 kg CZV verbruikt per accumulatie. De verwachte vaste stof productie uit de toegevoerde CZV is dan in te schatten op basis van een CZV-yield van ca. 60% en een verwacht CZV-gehalte van PHA-rijke biomassa van ongeveer 1.6 g CZV/g VSS. 100–200 kg CZV omgezet vertaalt zich dan in een productie van ca. 40 – 80 kg vastestof, ofwel een eindhoeveelheid vastestof, samen met toegevoegd entslib, van ongeveer 80 -120 kg.

In Figuur 8 is in een boxplot voor een jaar aan accumulaties de variatie weergegeven in de massabalansen. In de figuur kan de verwachte hoeveelheid vastestof (solids) aan het eind van de accumulatie op basis van begingehalte en hoeveelheid CZV die werd verbruikt (licht groen) worden vergeleken met de gemeten eindhoeveelheid (blauw). Na bezinken van het slib aan het eind van de accumulatie werd het slib overgepompt en kon de hoeveelheid vastestof in de aanzuurtank/voedingstank naar de decanter worden bepaald (geel). Tenslotte werd na drogen het gewicht van het droogproduct vastgesteld (donkergroen). Te zien is dat over het algemeen de gemeten hoeveelheid vastestof aan het eind van de accumulatie redelijk overeenkomt met de verwachting. Wat opvalt is dat de hoeveelheid product na drogen

slechts grofweg 50% bedraagt van de hoeveelheid vaste stof die aan het eind van de accumulatie wordt verwacht en gemeten. Het verlies aan materiaal treedt voor het grootste deel tijdens de ontwatering op (zie samenvatting resultaten ontwateren en drogen).

FIGUUR 8

BOXPLOT VAN DE RESULTATEN VOOR DE MASSABALANSEN VOOR VASTE STOF VOOR ALLE ACCUMULATIEBATCHES



#### CONCLUSIE DIRECTE ACCUMULATIES

De in totaal 115 uitgevoerde accumulaties met verschillende vetzuurhoudende stromen hebben veel PHA-rijk halffabricaat opgeleverd en ook veel inzicht gegevens in de parameters die belangrijk zijn voor het optimaal draaien van een full-scale productiefaciliteit voor PHA-rijk halffabricaat. Tevens werden technische/technologische design parameters (zoals bijvoorbeeld zuurstofoverdracht) bevestigd op een demoschaal die relevant is voor vertaling naar full scale.

Geconcludeerd kan worden dat 35–40% PHA/VSS zeer goed haalbaar is en wellicht zelfs hogere waarden mogelijk zijn, als een aantal zaken in een volgende installatie beter gecontroleerd kunnen worden, zoals:

- Gecontroleerde en volledige verzuring van CZV-houdende stromen die gebruikt worden voor PHA-productie;
- Verwijdering van solids na verzuring van de CZV-houdende stromen, voordat accumulaties worden uitgevoerd;
- Een betere monitoring van het PHA-gehalte in de tijd tijdens accumulaties, optimale accumulatie tijd en operationele condities te kunnen vaststellen;
- Meer controle over de starttemperatuur van accumulaties.

Tevens is het te adviseren aanvullend onderzoek te doen, om enerzijds meer begrip te krijgen van het effect van (ratio's in) N, P en (sporen)metalen op accumulaties, en met name het effect van eventuele fluctuaties in bio-beschikbare P en Fe in het gebruikte secundaire slib en anderzijds te kijken of dit begrip kan worden vertaald in nog hogere realiseerbare PHA gehalten in de PHA-rijk halffabricaat.

### 3.2.4.3 ONTWATERING PHA-RIJK HALFFABRICAAT

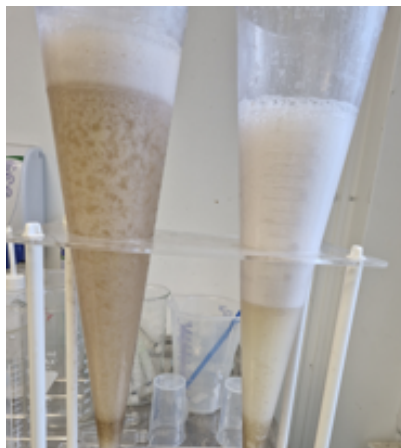
Voor het ontwateren van het geproduceerde PHA-rijk halffabricaat is er gebruik gemaakt van een Varipondtype decanteercentrifuge van het bedrijf GEA. Deze kan worden bedreven met een variabel toerenverschil tussen de trommel en de schroef, om zo bij deze wisselende productsamenstelling het drogestofgehalte van de cake en centraatkwaliteit te kunnen reguleren. Daarnaast biedt de Variponddecanter de mogelijkheid om tijdens bedrijf de pond-/vijverdiepte in te kunnen stellen. De Variponddecanter bevat een vlotter-schijf die voor geforceerde vloeistofafvoer onder het oppervlak zorgt. Door de extra schijf en perslucht te gebruiken, wordt de vijverdiepte vergroot en wordt vastestof, aanwezig in de schuimfractie bovenop de vloeistoffase, beter vastgehouden en kunnen productverliezen worden geminimaliseerd. Gebaseerd op positieve resultaten van de proeftesten in Leeuwarden in 2020 was in het ontwerp van de PHA2USE demo-installatie geen doseermogelijkheid voor polyelectrolyet (PE) opgenomen.

De ontwatering van een batch PHA-rijk halffabricaat na een accumulatie of verzameld tijdens het selectieproces, wordt batchgewijs uitgevoerd. Hierbij wordt 8 -10 m<sup>3</sup> water met PHA-rijk halffabricaat in een paar uur ontwaterd. In eerste instantie wordt het centraat teruggestuurd naar de tank, totdat dit helder genoeg is en vervolgens wordt het centraat naar de effluent-tank gestuurd. Ondanks het feit dat het centraat vaak helder was en er relatief lage vastestofconcentraties gemeten werden in het centraat, ging er toch veel vastestof verloren en werd beduidend minder koek geproduceerd dan verwacht.

Tijdens het aanzuren van het PHA-rijke halffabricaat met zuur wordt er CO<sub>2</sub> gevormd, dat als gas vrijkomt en voor schuimvorming zorgt. Vooral tijdens het stevig mixen van de vloeistof in de decanter, komt er veel CO<sub>2</sub> vrij als gas en dit zorgt ervoor dat veel eiwitten en aanhangende vaste stof naar de schuimfase gaan. Onderstaand een foto van aangezuurd PHA-rijk halffabricaat die de decanter ingaat en de schuimvorming die ontstaat tijdens het decanteren. Gemeten drogestofverliezen variëren tussen de 5-20% in het centraat. Vanaf week 16, 2023, werden de hoeveelheden TSS in het centraat aanzienlijk minder door een aanpassing van de decanterinstelling, waarbij er een lager toerenverschil kon worden gehanteerd.

FIGUUR 9

LINKS DE INGAANDE PHA-RIJKE BIOMASSA STROOM NAAR DE DECANter EN RECHTS HET UITTREDENDE CENTRAAT MET DE SCHUIMVORMING



Het was erg moeilijk om goed vast te kunnen stellen wat de verliezen in het schuimdeel van het centraat uit de decanter waren ten opzichte van de gemeten TSS gehalten in de vloeistoffractie van centraat. In eerste instantie werd aangenomen dat de verliezen via centraat rede-

lijk klein waren omdat het centraat vrij helder was. Dit bleek alleen niet zo te zijn als ook de schuimfractie werd meegenomen.

Eenmalig is er een goede massabalans van de ontwateringcyclus gemaakt, waarbij tijdens het decanteren is gemonitord in welke fractie de ingaande vaste stof de decanter verlaat. Deze massabalans liet zien dat tijdens deze run de gemeten verliezen in het schuim behoorlijk hoog waren en dat de totale productverliezen 50 - 65 % bedroegen. Deze bevinding is in lijn met de hoeveelheid product die als cake en droog product per batch werden geoogst en de hoeveelheid vaste stof die er oorspronkelijk in de aanzuurreactor aanwezig was. Deze verschillen varieerden per batch behoorlijk en kon voor sommige batches zelfs oplopen tot >50% verlies aan product.

Tijdens verschillende batches is vervolgens antischuim gedoseerd in de voedingstank/aanzuurreactor net voor het starten van de ontwatering. Dit hielp echter niet om dit probleem op te lossen.

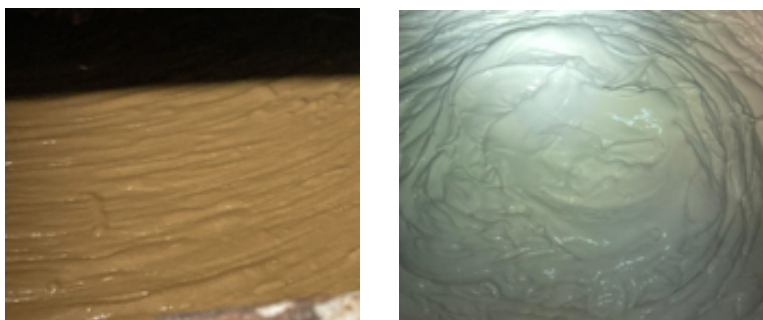
Het drogestofgehalte (DS) in de decanter cake varieerde met de verschillende productsamensellingen tussen de 10 en 18 % DS. In de selectieperioden liggen de DS gemiddeld zelfs nog iets lager, met uitzondering van de periode waarin substraat met een hoger calciumgehalte is toegepast. De hogere calciumconcentratie zorgt voor een hoger anorganisch gehalte in het slib en daarmee een beter scheidend vermogen.

In het algemeen is het drogestofgehalte van het PHA-rijke halffabricaat in de ontwaterde decantercake aan de lage kant en bleek het lastig om zowel een goede productscheiding als een drogere cake te krijgen bij meeste productbatches. Het gemiddelde drogestofgehalte van 10-15% vormde echter geen probleem voor het verpompen van het ontwaterde slib naar de dubbeledrumdroger.

De ontwatering is een uitdaging omdat er geen goede flocculatie is van de biomassa. De lage pH en daarmee gepaarde gasontwikkeling vergroot de uitdaging. Voorbeelden van de ontwaterde cake verkregen uit de decanter zijn in Figuur 10 weergegeven.

FIGUUR 10

TWEE VOORBEELDEN VAN ONTWATERDE CAKE VAN HET PHA-RIJK HALFFABRICAAT



#### 3.2.4.4 DROGING VAN HET PHA-RIJK HALFFABRICAAT

Het geproduceerde PHA-rijk halffabricaat na ontwatering werd bij de PHA2USE demo-installatie verder gedroogd met een dubbele drum droger. Dit type droger is zeer geschikt voor de toepassing op kleinere schaal, bij uiteenlopende samenstelling van voeding (droge stof, anorganisch/organisch, PHA), verkrijgen van consistente productkwaliteit en relatief eenvoudig te opereren (ook bij de fluctuaties in voeding).

De droger wordt met stoom (160 °C) aan de binnenzijde van de drums opgewarmd en de product cake wordt aan de buitenzijde in de wigvormige ruimte tussen beide trommels toegevoegd. De warmte zal van het trommel oppervlak naar de cake worden overgedragen, waarbij de temperatuur van het product oploopt en water verdampt. Met messen wordt het droge product vervolgens van de trommels geschraapt. De contacttijd van de PHA biomassa wordt bepaald door de draaisnelheid van de trommel, het punt waarop de cake wordt gevoed op de trommel en het punt waarop de gedroogde PHA-biomassa van de drum wordt geschraapt.

Het drogen van het slib verliep met de stoomgevoede dubbeledrumdroger zonder veel problemen. Met een korte contacttijd werd het slib gedroogd tot een drogestofconcentratie van ~95%. Alleen week 15-16 was afwijkend. Toen bleef het slib natter, omdat uit de decantercentrifuge brokjes materiaal kwamen die in een eerdere periode in de decanter waren opgehoopt. Na flink spoelen van de decanter was dit probleem verdwenen.

Droog product, PHA-rijk halffabricaat, kon gedurende de projectduur van 2 jaar met <10% watergehalte worden verkregen. Tijdens stabiel opereren werd zelfs een droog product met <5% watergehalte verkregen.

Door wisselende samenstellingen van de PHA-biomassa cake, wijze van procesvoering en fluctuerende prestaties van decantercentrifuge, zijn er enkele batches met een hoger watergehalte. Deze batches vonden meer tijdens de opstartfase van het project plaats. Tijdens de projectduur is er slechts één periode geweest waarbij het droogproces niet goed functioneerde. Dit was te wijten aan de hoge concentraties anorganisch materiaal aanwezig in de voeding, kleine brokstukjes calciumsulfaat en/of calciumcarbonaat. Deze brokstukjes hebben ervoor gezorgd dat de ruimte tussen de drums groter is geworden, resulterend in een dikkere laag PHA-biomassa op de drums en onvoldoende warmteoverdracht.

### **OPSCHALING VAN HET DROOGPROCES**

In het project is ervoor gekozen om een dubbeledrumdroger te gebruiken. Deze droger was geselecteerd omdat de contacttijd van het slib bij hoge temperatuur vrij kort is (10-20 s) waardoor er minder thermische afbraak van het PHA in de biomassa werd verwacht. Een dergelijke droger is echter relatief duur qua investering voor grotere schaalgroottes en daarom zijn in samenwerking met een drogerleverancier (Andritz) gedurende het project proeven gedaan om ook de mogelijkheden voor andere drogers te evalueren. Als alternatieven werden een banddroger en een wervelbed droger onderzocht en beiden zijn op pilotschaal getest met materiaal uit de demo-installatie uit Dordrecht.

Omdat het ontwaterde PHA-rijke halffabricaat door de moeilijke mechanische ontwatering een lage consistentie had, kon dit materiaal niet direct gevoed worden aan de drogers. Hiervoor moet het eerst opgemengd worden met al gedroogd materiaal door backmixing. Het onderzoek richtte zich met name op de effecten van de droging op de afname van het molecuulgewicht van het PHA als functie van de verblijftijd in de droger. De resultaten lieten zien dat bij normale verblijftijden in deze drogers de afbraak beperkt is. Alleen als rekening gehouden wordt met de nu noodzakelijk geachte recirculatie is er wel sprake van meer afbraak (tot ca. 50% van het molecuulgewicht) doordat de verblijftijden verder toenemen. De geconstateerde afbraak is nog acceptabel voor de beoogde toepassingen en daarom wordt geconcludeerd dat beide alternatieve drogers geschikt kunnen zijn.

### 3.3 EXTRACTIE

#### 3.3.4.1 INLEIDING

Conform het plan zijn er extracties van het PHA-rijk halffabricaat uitgevoerd in bestaande industriële apparatuur bij Fraunhofer in Duitsland. Hierbij is een methode gebruikt vergelijkbaar met die beschreven in het PHARIO rapport. In totaal is hiermee 226 kg aan Caleyda® verkregen.

#### 3.3.4.2 RESULTATEN

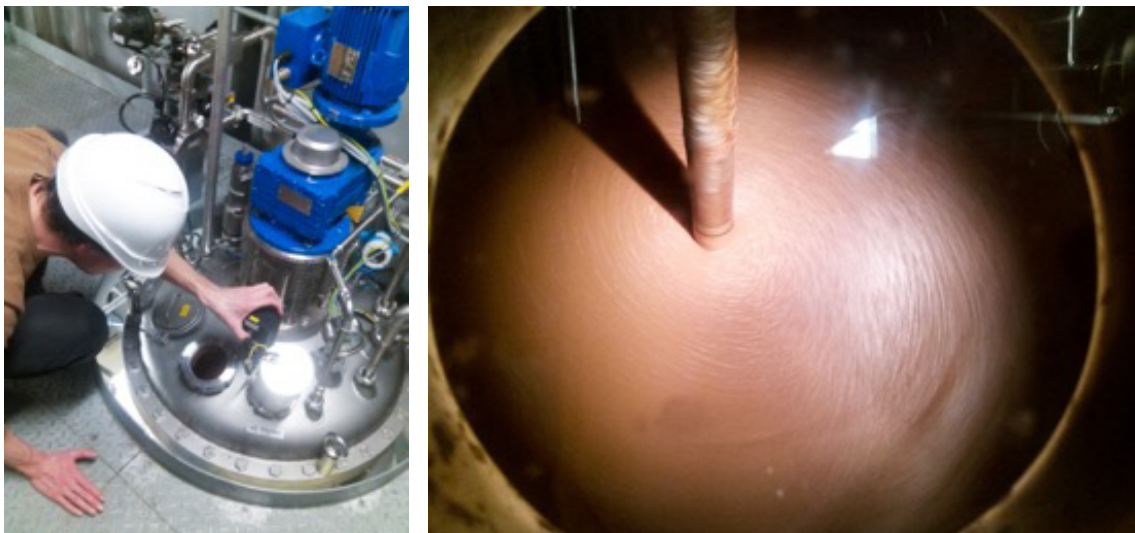
In het project zijn er in totaal vier campagnes uitgevoerd bij Fraunhofer om PHA te extraheren uit een PHA-rijk halffabricaat. De eerste campagne vond in 2021 plaats met biomassa uit de Leeuwarden-pilot en diende als voorbereiding om de technische haalbaarheid te bevestigen. De volgende campagnes, uitgevoerd in 2023, maakten gebruik van biomassa uit de PHA2USE-installatie in Dordrecht.

In totaal is er ruim 1000 kg PHA-rijk halffabricaat ingezet in de extracties met in totaal 283 kg PHA. Na uitvoering van alle extracties is 226 kg Caleyda® verkregen met daarin 195 kg PHA. Het molecuulgewicht van het verkregen PHA lag gemiddelde rond de 360 kDa en varieerde tussen 290 en 570 kDa. Dit resultaat was in lijn met eerdere resultaten zoals gerapporteerd in het PHARIO-project op een veel kleinere schaal.

Er zijn twee batches van Caleyda® geproduceerd met verschillende smeltpunten, variërend van 155 tot 180 °C met ook verschillende molecuulgewichten. De eerste serie van vier batches (71 kg hoog smeltpunt) is in Q1-Q2 2023 geproduceerd, de tweede serie van vier batches (140 kg lager smeltpunt) in Q3 2023-Q1 2024. Hiervan is 93 kg gepelletiseerd.

De eerste extractiecampagne bij Fraunhofer bestond uit drie fasen: extractie, wassen en drogen. Over het algemeen verliep de extractie dankzij de goede voorbereidingen zoals gepland, vergelijkbaar met eerdere kleinschaligere pilots waarbij er wel ook enkele aandachtspunten naar boven zijn gekomen die echter goed oplosbaar zijn.

FIGUUR 11 EXTRACTIE VAN CALEYDA® UIT HET PHA-RIJK HALFFABRICAAT IN DUITSLAND





### 3.3.4.3 EXTRUSIE VAN CELAYDA® IN PELLETS

Het bij Fraunhofer geëxtraheerde PHA was beschikbaar in poedervorm of onregelmatige granulaatvorm. Dit was echter lastig te gebruiken in verschillende processen, aangezien de meeste toepassingspartners een gepelletiseerde vorm nodig hadden om Caleyda in hun machines te kunnen verwerken. Pellets zijn bovendien de meest gangbare vorm waarin polymeren op de markt verkrijgbaar zijn. Daarom was het van cruciaal belang voor de toepassing en marktontwikkeling om het geëxtraheerde PHA te pelletiseren tot Caleyda-pellets.

Met deze doelen voor ogen benaderde Paques Biomaterials een industriële compounder die de afgelopen jaren heeft geëxperimenteerd met PHA's. Deze compounder werd ingeschakeld om het geëxtraheerde PHA te extruderen en te pelletiseren tot Caleyda-pellets. Voorafgaand aan het proces werden alle thermische gegevens over het geëxtraheerde PHA gedeeld en besproken, waarbij de nadruk lag op de noodzaak om de sporen van oplosmiddelen te ontgassen. Daarnaast adviseerde de compounder om een nucleëringsmiddel toe te voegen om het kristallisatiegedrag van Caleyda te verbeteren. Uiteindelijk is er 117 kg aan pellets gemaakt.

**FIGUUR 12** LINKSBOVEN: CALEYDA-PELLETS, LINKSONDER GEËXTRUDEERD FILAMENT DAT DE EXTRUDER UITKOMT. RECHTSBOVEN: CALEYDA NA KOELBAD, RECHTSONDER: VOEDING AAN DE EXTRUDER



## 4

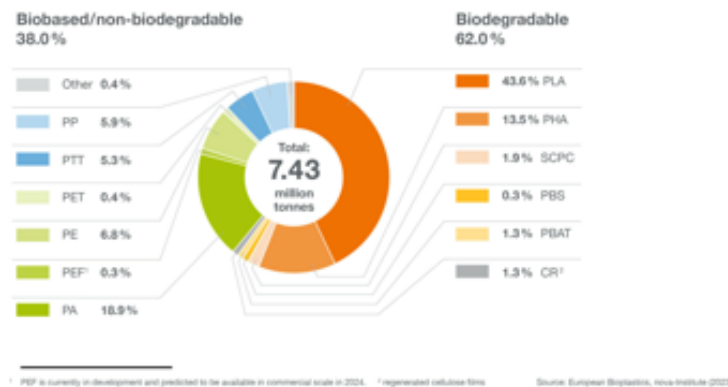
## TOEPASSING VAN CALEYDA®

## 4.1 PHA: PRODUCTIECAPACITEIT EN MARKTAANDEEL

De markt van PHA groeit naar verwachting van 100 Kton/jaar in 2023 naar 1000 Kton/jaar in 2028. De vraag van circulaire producten neemt gestaag toe, met name waar bioafbreekbaarheid gewenst is. Vooral de bedrijven die duurzaamheid hoog op de agenda hebben staan, zijn geïnteresseerd in alternatieve grondstoffen, mits deze voldoen aan functionaliteit, verwerkbaarheid en prijs.

FIGUUR 13 VERWACHTE WERELDWIJDE CAPACITEIT BIOPLASTICS IN 2028 (EUROPEAN BIOPLASTICS 2023)

## Global production capacities of bioplastics 2028



De belangrijkste producenten van PHA zijn: Danimer Scientific/RWDC, Tianan en Newlight, die tezamen een productiecapaciteit vertegenwoordigen van ca 30 kton/jaar met een verwachte uitbreiding naar 185 kton in 2025 volgens de WUR (2022)<sup>2</sup>. Ook nieuwe spelers hebben ambities om te gaan produceren (raming 30 kton). Dit is totaal ca 1-2% van de wereldmarkt aan (fossiele) plastics. Een deel van dit PHA is foodgrade gecertificeerd. Een recente studie van Bioplastics Europe schat de productiecapaciteit in 2028 op 1 miljoen ton PHA kan liggen, wat ca 13% van de totale bioplasticsmarkt vertegenwoordigt. Het beleidsraamwerk in de EU loopt achter op Azië, waardoor er meer geïnvesteerd wordt in Azië dan in Europa. Het is te hopen dat de nieuwe Europese Commissie meer focus gaat leggen op het ontwikkelen van deze industrie.

## 4.2 VERGELIJKING CALEYDA® MET ANDERE BIOPLASTICS

Een onderscheidend vermogen van Caleyda® ten opzichte van de PHA's van andere producenten is dat deze producenten grotendeels zijn gevestigd in de VS, China en Japan. Dit zijn doorgaans reïncultuur fermentaties waarbij zetmeel, suiker en plantaardige oliën worden gebruikt als grondstof, die (speciaal hiervoor) geteeld wordt, hetgeen impact heeft op de footprint. Caleyda® is geproduceerd uit organische reststromen, en is daardoor volledig circulair

2 WUR Molenveld, K., Post, W., Ferreira, S. F., de Sévaux, G., & Hartstra, M. (2022). Paving the way for biobased materials: a roadmap for the market introduction of PHAs. (Report / Wageningen Food & Biobased Research; No. 2240). Wageningen Food & Biobased Research. <https://doi.org/10.18174/561676>

met minder impact op CO<sub>2</sub> uitstoot. De kwaliteiten (grades) van deze producenten, waaronder PHBH, PHBV, PHB, hebben onderling ook andere mechanische en thermische eigenschappen.

PHA wordt in de markt ingezet in die applicaties waar biobased en bioafbreekbaar (vanwege microplastics) noodzakelijk zijn en ook om de eigenschappen van andere biobased polymeren zoals PLA te verbeteren (versneld af te breken). In onderstaande tabel is goed te zien waar de verschillende (biobased) polymeren zich in onderscheiden qua afbreekbaarheid.

TABEL 2 POTENTIËLE BIOAFBREEKBAARHEID (BRON: WUR 2022)

Plastic type	Industrial composting (EN13432)	Home composting	Soil (EN 17033)	Marine
Maximum Time Frame biodegradatio	6 months	12 months	24 months	6 months
Cellulose acetate	Some grades	Some grades	Some grades	Some grades
PLA	Yes	No	No	No
PBS	Yes	No	No	No
PHB	Yes	Yes	Yes	Yes
PBAT	Yes	Yes	Yes	No
Starch based plastics	Yes	Specific grades	Specific grades	Specific grades
Starch	Yes	Yes	Yes	Yes
Cellophane	Yes	Yes	Yes	Yes

In vergelijking met de twee belangrijkste concurrenten (PLA: 43% marktaandeel, biobased, matig bioafbreekbaar, PBAT: laag marktaandeel, synthetisch, goed bioafbreekbaar) ligt de prijs van PHA ca. 50% hoger.

Het onderzoek van de WUR laat zien waar PHA vooral ingezet kan worden, vanuit het perspectief van de technische eigenschappen (mechanisch en thermisch) in relatie tot de match met bepaalde plastic verwerkingsprocessen, en de marktbehoefte vanuit eigenschappen van afbreekbaarheid (Figuur 14).

FIGUUR 14 BELANGRIJKSTE TOEPASSINGSGEBIEDEN VOOR PHA (WUR, 2022)



### 4.3 RESULTATEN INTERACTIE MET APPLICATIEPARTNERS

#### 4.3.1 INLEIDING

Eén van de doelstellingen van het project was het verkrijgen van zicht op (conditionele) afnameovereenkomsten voor de afzet van 3 kton/jr Caleyda® (50% van een toekomstige commerciële installatie) door middel van het evalueren van de in het project geproduceerde samples bij relevante afnamepartners. Er zijn 2 series batches Caleyda® geproduceerd met verschillende smeltpunten, variërend van 155 tot 180 °C met ook verschillende molecuulgewichten. Daarnaast is niet-geëxtraheerde PHA-rijke biomassa geproduceerd genaamd PHA-X®. Dit materiaal bestaat voor ca 30-40% van de VSS uit PHA. Een duidelijke eigenschap van de biomassa met lage PHA-concentraties is dat het product na spuitgieten erg buigzaam is.

In de volgende hoofdstukken wordt geschetst welke marktontwikkelingen er zijn voor PHA, hoe is gekomen tot een selectie van mogelijke markten en partners, hoe Caleyda® bij hen is geëvalueerd en tot welke resultaten en perspectieven dit op hoofdlijnen heeft geleid.

#### 4.3.2 SELECTIE PARTNERS

Hoewel de waterschappen het PHA-rijk halffabricaat beogen af te zetten via Paques Biomaterials als afnemer, hebben alle partijen belang bij een helder beeld van de afzetmarkt achter deze keten. Tijdens het project zijn diverse toepassingen voor Caleyda® en PHA-X®, geëvalueerd door Paques Biomaterials en AquaMinerals (coördinator). De relevante markten zijn bepaald door de volgende criteria:

- Toepassingen waar er een groot risico is op verlies van plastic naar de omgeving (als microplastic) hebben prioriteit;
- Non-food markten, waarbij volledige bio afbreekbaarheid nodig is hebben prioriteit;
- Toepassingen waar producten niet recyclebaar zijn hebben prioriteit;
- Er moet genoeg marktvolume en voldoende prijsmarge zijn;
- De mechanische en thermische eigenschappen moeten passen bij het materiaal.

Verder is er ook gekeken naar andere afwegingen zoals spreiding in verwerkingstechnieken, hoeveelheid benodigd samplmateriaal en commitment van partners. Hieruit heeft het PHA2USE business development team zes toepassingen geselecteerd:

1. Voedingsstof in activering van zelfhelend beton;
2. Bioafbreekbare stek en zaaipluggen, foams, en andere toepassingen voor de tuinbouw.
3. Bioafbreekbare coating van urea en NPK-meststoffen (slow of controlled release);
4. Coating van papier voor hydrofobe toepassingen;
5. Bioafbreekbare lijmen voor verschillende toepassingen;
6. Specialties: textiel, ecorestauratie, kantoormeubelen.

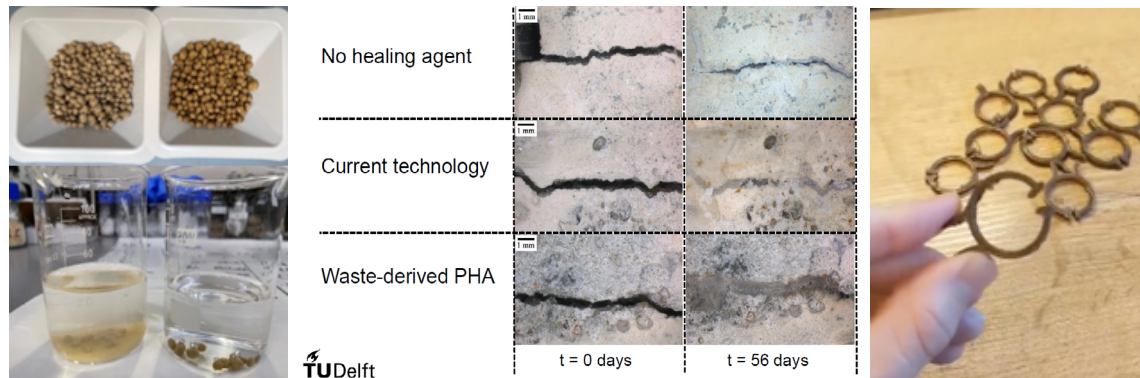
#### 4.3.3 RESULTATEN MARKTONTWIKKELING

Met het verkregen materiaal en na selectie van beoogde samenwerkingspartners zijn er door deze partners testen gedaan met het materiaal. Deze testen en klantcontacten bevestigen dat er een duidelijk marktpotentieel is om een extractiefabriek van 6000 ton/j Caleyda® te bouwen, tegen een marktprijs die past bij een haalbare business case<sup>3</sup>. De niche voor Caleyda ligt in toepassingen waarbij een goede biologische afbreekbaarheid waarde toevoegt aan het eindproduct omdat andere materialen dan niet bruikbaar zijn. In rapporten van onder andere Wageningen Universiteit en NOVA instituut zijn deze niches

3 Deze marktprijs is bij de projectpartners bekend maar om reden van concurrentie gevoeligheid is deze prijs niet in dit document opgenomen.

verder uitgewerkt<sup>4,5</sup>. Niet alle toepassingen kunnen in het openbaar gedeeld worden maar voorbeelden zijn meststoffen met een afbreekbare coating (controlled release fertilisers), een additief in zelfhelend beton, afbreekbare stek- en zaaipluggen voor in de landbouw en afbreekbare coatings op papier.

**FIGUUR 15** VOORBEELDEN VAN TOEPASSINGEN VAN CALEYDA®. LINKS ALS COATING VAN MESTSTOFFEN, MIDDEN ALS ADDITIEF IN ZELFHELEND BETON, RECHTS CLIPS VOOR TOMATENPLATEN



Gedurende het project is er ook aandacht gekomen voor de mogelijkheden om het PHA-rijk halffabricaat direct te gebruiken in toepassingen zonder extractie van het PHA onder de naam PHA-X®. In het project is aangetoond dat via extrusie- en spuitgietmethoden PHA-X® inderdaad goed bruikbaar is voor het maken van bepaalde producten met toepassing in bijvoorbeeld de horticultuur.

Een groot voordeel van deze ontwikkeling zou zijn dat eerst de productie van halffabricaat kan worden opgezet via afzet van PHA-X® waarna later de extractie wordt gerealiseerd. Dit is vooral mogelijk als het halffabricaat een hoog gehalte aan PHA bevat en de verontreinigingen in de biomassa geen bezwaar vormen voor de toepassing. Daarom is deze ontwikkeling relevanter voor PHA-rijk halffabricaat dat via de selectiemethode geproduceerd wordt. Voor PHA-rijk halffabricaat dat met de PHARIO-methode wordt gemaakt wordt zal het PHA percentage lager zijn en zullen er ook meer verontreinigingen meekomen waardoor de kansen om het materiaal als PHA-X® af te zetten beperkter zijn. Wanneer halffabricaat via de selectiemethode gemaakt wordt uit vetzuren van waterschapslib lijkt deze route kansrijker.

#### ONDERKANT FORMULIER

Het testen en evalueren van het materiaal blijkt een proces dat veel tijd kost. Er is maar een beperkte hoeveelheid materiaal beschikbaar en daarom worden eventuele partners kritisch geselecteerd. Als er eenmaal getest wordt moeten in interactie met de afnemer de resultaten geëvalueerd worden, waarna vaak nieuwe testen nodig zijn onder aangepaste condities of met een net iets ander materiaal. Dit iteratieve proces kost tijd en ook al is er meer Caleyda® beschikbaar dan nog zijn de beschikbare hoeveelheden beperkt zodat niet alle testen nu kunnen worden uitgevoerd. Daarom wordt verwacht dat er nog enige tijd nodig zal zijn voordat alle testen zijn afgerond en er toegewerkt kan worden naar concrete afnamecontracten. Een ruimere beschikbaarheid van het materiaal kan dit proces versnellen en daarom heeft Paques Biomaterials besloten om een eigen extractie faciliteit te bouwen die

4 Molenveld, K., Post, W., Ferreira, S. F., de Sévaux, G., & Hartstra, M. (2022). Paving the way for biobased materials: a roadmap for the market introduction of PHAs. (Report / Wageningen Food & Biobased Research; No. 2240). Wageningen Food & Biobased Research. <https://doi.org/10.18174/561676>

5 Bauchmüller, V., et al. „BioSinn-Products for Which Biodegradation Makes Sense; nova-Institut für politische und ökologische Innovation GmbH: Hürth.“ (2021)

het resterende halffabricaat uit het project (en eventueel nieuw te maken materiaal) kan extraheren. Dit is onderdeel van een recente investeringsronde van 14 M€ in het bedrijf Paques Biomaterials door private partijen.

#### 4.3.4 EINDE AFVAL STATUS

Teruggewonnen stoffen uit zuiveringsslib zijn afvalstoffen. Afvalstoffen mogen alleen worden ingenomen door een vergunde afvalverwerker. Om het uit zuiveringsslib gewonnen Caleyda® en/of PHA-X® te kunnen vermarkten moet dit de einde-afvalstatus verkrijgen. De voorwaarden voor een einde-afvalstatus zijn dat er een markt is voor de stof is, er voldaan wordt aan de relevante wetgeving, en gebruik van de stof veilig is voor mens en milieu. De omgevingsdiensten zijn bevoegd gezag om vast te stellen of een stof einde-afval is. Een houder/producent van een stof kan ook een zelfbeoordeling doen, deze biedt echter geen juridische zekerheid, zeker in relatie tot te nemen investeringsbeslissingen. Op basis van de zelfbeoordeling kan als gewenst ook een omgevingsdienst om een rechtsoordeel gevraagd worden. Gezien de status van het project in 2024 was een zelfbeoordeling een eerste stap om in te schatten of er obstakels zijn voor het verkrijgen van de einde-afvalstatus. Gezien de beperkte capaciteit voor het verkrijgen van rechtsoordelen lijkt op dit moment de route richting een zelfbeoordeling de meest begaanbare weg.

Flankerend aan het PHA2USE-project is er een start met een zelfbeoordeling einde-afval gemaakt in het kader van een Moonshotproject. Een Moonshotproject is een project waarin partijen samen werken aan de realisatie van een circulaire business case. Jaarlijks worden een aantal Moonshots ondersteund door het Versnellingshuis Nederland circulair. De Moonshot PHA is ingestoken als een testcase om te kijken of we einde-afval op systeemdoorbrekende wijze sneller kunnen realiseren. De ervaring met andere stoffen uit het riool, zoals struviet, cellulose en Kaumera gewonnen uit afvalwater leert dat het verkrijgen van einde-afval een uiterst lastig en tijdrovend proces is. Tijdens de looptijd van de Moonshot is het einde-afval-dossier niet afgerond maar is een eerste beeld verkregen van de mogelijke risico's. Er zijn analyses uitgevoerd van Caleyda® gericht op potentiële risico's voor mens en milieu en deze zijn geïnterpreteerd door een toxicoloog en Paques Biomaterials (als beoogde partij die het materiaal zal gaan afzetten). Daarnaast is literatuuronderzoek uitgevoerd door Alan Werker van Promiko.

Het literatuuronderzoek toont aan dat de extractiemethode invloed heeft op de verontreinigingen in Caleyda®. Hoe zuiverder het Caleyda®, hoe minder verontreinigingen. Verontreinigingen lijken vooral te hechten aan het oplosmiddel, niet aan het Caleyda® zelf. Dit verband moet verder worden onderzocht. Als dit standhoudt, zou de bron van het Caleyda® minder relevant zijn.

Het PHA-monster dat naar de laboratoria werd gestuurd, was een mengsel van verschillende PHA-accumulaties uit de installatie in Dordrecht. De onderstaande tabel geeft aan welke batches hiervoor gebruikt zijn. In alle gevallen is steeds een synthetisch mengsel van vetzuren (mengsel van azijnzuur/propionzuur) gebruikt als grondstof. In twee van de vijf submonsters was secundair slib van de rwzi Bath als actieve biomassa gebruikt. In de andere gevallen is de selectie aanpak gebruikt waarbij eerst met de grondstof een actieve biomassa is opgekweekt.

TABEL 3

HERKOMST GEANALYSEERD CALEYDA® MENGMONSTER

Monster	% van monster (o.b.v. totale massa)	Selectie/accumulatie	Vetzuurbron
P2U-B2-22-14C	4	Selectie	Synthetisch mengsel
P2U-B1-22-15A	28	Accumulatie met sec.slib rwzi Bath	Synthetisch mengsel
P2U-B1-22-15C	11	Accumulatie met sec.slib rwzi Bath	Synthetisch mengsel
P2U-B2-22-51CDE	37	Selectie	Synthetisch mengsel
P2U-B2-22-52BCD	20	Selectie	Synthetisch mengsel

Gezien deze herkomst kan het mengmonster als relatief schoon worden beschouwd in vergelijking met een toekomstige productie waarbij ook de vetzuren uit primair slib worden gemaakt. Niettemin is te verwachten dat de meeste verontreinigingen via de biomassa (secundair slib) geïntroduceerd worden omdat de meeste verontreinigingen slecht oplosbaar zijn. Er is geen PHA-X® getest in het Moonshot project.

Het Fraunhofer-laboratorium heeft een brede screening uitgevoerd naar verontreinigingen in het Caleyda®, daarnaast zijn zware metalen geanalyseerd. Er werden verschillende verontreinigingen aangetroffen. Een toxicoloog selecteerde voor welke stoffen een risico-inschatting nodig was: twee zeer zorgwekkende stoffen, een groep persistente stoffen die zich kunnen ophopen in mens of bodem, en een groep stoffen die zeer schadelijk zijn voor waterorganismen als ze uitspoelen naar grond- of oppervlaktewater.

De laboratoriumresultaten van Caleyda® zijn moeilijk te interpreteren, de risico's voor mens en milieu zijn daardoor onvoldoende duidelijk. Er zijn geen definitieve obstakels gevonden, maar er is tegelijkertijd ook nog weinig zekerheid. In een volgende fase zullen, voortbordurende op de huidige resultaten, meer analyses gedaan moeten worden met verbeterde analysemethoden om een definitieve risicoanalyse te kunnen maken die nodig is voor een gedegen einde-afvaldossier en investeringsbeslissing.

Als ervoor gekozen wordt om een rechtsoordeel te vragen bij het bevoegd gezag kan dit gebeuren in het kader van de vergunningverlening voor de Caleyda® extractiefabriek. Het is dan verstandig om de omgevingsdienst al zo vroeg mogelijk te betrekken zodat er voldoende tijd is om de einde-afvalonderbouwing uit te werken en te laten beoordelen. De ervaring met Kaamera leert dat hier enkele jaren overheen kunnen gaan. Voor PHA-X® is geen zelfbeoordeling gedaan.

Het vaststellen van welke risicovolle stoffen (ZZS) er in de polymeermatrix van Caleyda zitten vereist specifieke knowhow van laboratoria en de inzet van dure apparatuur. Voor de einde-afval beoordeling van PHA-X® afkomstig van zuiveringsslib geldt dat in het bijzonder concrete toepassingen buiten het zelfhelende beton beoordeeld zullen moeten worden, van zowel PHA-X® uit de selectiemethode (vermoedelijk schoner) als ook de accumulatiemethode.

Het is daarom aan te bevelen dat een vervolgtraject Caleyda en PHA-X® deels ingevuld wordt door bijvoorbeeld een postdoc bij een kennisinstelling, waar ook mogelijk gespecialiseerde apparatuur aanwezig is (behoudens de bioassays). Hierbij kunnen experts van AquaMinerals, Paques Biomaterials en externe toxicologen een adviserende rol vervullen.

#### 4.4 CONCLUSIE

##### **GOEDE BUSINESS EN VALUE CASE IN RELATIE TOT CONCURRERENDE PHA-PRODUCTIE. DUURDER DAN PLA**

De vraag naar circulaire producten en polymeren neemt gestaag toe, met name waar bioafbreekbaarheid gewenst is. Vooral de bedrijven die duurzaamheid hoog op de agenda hebben staan zijn geïnteresseerd in alternatieve grondstoffen, mits het voldoet aan functionaliteit, verwerkbaarheid en prijs. De markt van PHA groeit naar 1.000 kton/jaar in 2028 en heeft het op een na grootste marktaandeel (13%) in de bioplastics markt, naast PLA (43%) als grootste biopolymeer. Er zijn diverse producenten van PHA, de meesten bedrijven gevestigd in de VS en China, doorgaans uit reïncultuurfermentatie van suiker en plantaardige oliën. De huidige internationale prijssetting past bij de businesscase van Paques Biomaterials. PHA is duurder dan alternatieve biobased grondstoffen en plastics maar onderscheidt zich in excellente afbreekbaarheid en kan ook de afbreekbaarheid van PLA (grootste marktaandeel) versnellen. Caleyda® onderscheidt zich ten opzichte van zowel PLA als andere PHA's in de herkomst: niet uit geteelde gewassen, en in samenstelling: een hogere fractie van het copolymeer hydroxyvaleriaat.

##### **FEEDBACK IN KANSRIJKE MARKT MAAR NOG NIET VOLDOENDE BEELD**

In het project is 215 kg Caleyda® geproduceerd, veel minder en veel later dan het oorspronkelijke plan. Hiervan is inmiddels ca 50 kg verstrekt aan potentiële klanten in diverse markten, de rest is achtergehouden (deels voor vervolgstapen bij deze partners, deels voor nieuwe testen). Een deel hiervan lijkt technisch(economisch) te kunnen matchen met een afzetmarkt. In een specifieke markt lijkt Caleyda® kansrijk te kunnen worden: het spray- of smelt coaten van meststoffen zoals ureum en NPK. Hier is door een ontwikkelpartner op labschaal een gepatenteerd proof of concept ontwikkeld dat aan de eisen lijkt te kunnen voldoen. Caleyda® kan echter niet zonder de nu gebruikte polymeren vervangen omdat in de meeste gevallen het coatingsproces niet (direct) toepasbaar is. Als meststoffenbedrijven in de EU en de VS bereid zouden worden dit verder op te schalen en daarna te implementeren in hun fabrieken dan kan dit een relevante afzetmarkt worden, ook voor Caleyda® van waterschappen. Op het ontwikkelen van deze markt wordt nu vol ingezet.

Uit de verschillende klantevaluaties, met name vanuit gespecialiseerde compoundeurs, kreeg het project zeer positieve feedback op de mechanische eigenschappen van Caleyda®. In sommige gevallen overtrof het materiaal zelfs commercieel beschikbare en uitontwikkelde kwaliteiten, terwijl de Caleyda® kwaliteiten nog heel veel ruimte hebben voor verdere verbeteringen. Tegelijkertijd waren er ook uitdagingen voor Caleyda®. Voor sommige klanten was het smeltpunt van de aangeleverde kwaliteit niet laag genoeg en was er sprake van trage kristallisatie. Verder was de geur en kleur niet altijd passend en was er enige inconsistentie tussen batches/reproduceerbaarheid. Ook lijkt het erop dat voor veel toepassingen Caleyda® gecompoundeerd moet worden om variaties op te vangen in samenstelling maar ook om te tunen naar bepaalde eigenschappen. Deze factoren beïnvloeden het tempo van de marktontwikkeling.

Als we kijken naar de toepassingen voor Caleyda® en PHA-X® uit PHA rijk halffabricaat van waterschappen, dan zijn bepaalde toepassingen minder compatibel dan voor bijvoorbeeld PHA afkomstig uit afvalwater van de papierindustrie en bijproducten van levensmiddelen. Dit is een blijvend aandachtspunt in de marktontwikkeling. De mate van compatibiliteit zal vooral afhangen van de keuze voor de selectiemethode of accumulatiemethode. Bij de laatste methode komen mogelijk meer stoffen in het PHA-X® en Caleyda® terecht.



### EINDE AFVAL: EERSTE BEELD MAAR MEER ONDERZOEK NODIG

Voor wat betreft einde afval is de conclusie dat de laboratoriumresultaten van Caleyda® nog moeilijk te interpreteren zijn, de risico's voor mens en milieu zijn daardoor onvoldoende duidelijk. Er zijn geen definitieve obstakels gevonden, maar er is tegelijkertijd ook nog weinig zekerheid voor een investeringsbeslissing. In een volgende fase zullen, voortbordurende op de huidige resultaten, meer analyses gedaan moeten worden met verbeterde analysemethoden om een definitieve risicoanalyse te kunnen maken die nodig is voor een gedegen einde-afvaldossier en investeringsbeslissing.

Als ervoor gekozen wordt om een rechtsoordeel te vragen bij het bevoegd gezag, dan kan dit gebeuren in het kader van de vergunningverlening voor de Caleyda® extractiefabriek. Het is dan verstandig om de omgevingsdienst al zo vroeg mogelijk te betrekken zodat er voldoende tijd is om de einde-afvalonderbouwing uit te werken en te laten beoordelen. De ervaring met Kaamera (een andere stof uit rioolwater) leert dat hier enkele jaren overheen kunnen gaan. Voor PHA-X® is geen zelfbeoordeling gedaan.

### SWOT

Tot slot, uit een SWOT-analyse van Caleyda® kunnen de volgende conclusies worden getrokken.

**TABEL 4** SWOT ANALYSE (SPECIFIEK VOOR CALEYDA® VAN WATERSCHAPSSTROMEN)

<p><b>Sterkten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Biologische afbreekbaarheid in natuurlijke omgeving</li> <li>• Hoogwaardige recyclebaarheid</li> <li>• Biobased product dat fossiel product kan vervangen</li> <li>• Waste-based: geen landgebruik(circulair)</li> <li>• Goedkope grondstoffen, veel van aanwezig</li> </ul>	<p><b>Zwakten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Product moet niet te snel afbreken als het gebruikt wordt in ecorestoratatieprojecten</li> <li>• Voor recycling moet infrastructuur aanwezig zijn</li> <li>• Einde afvalstatus nog niet voldoende inzichtelijk, beperkt mogelijk enkele toepassingen</li> </ul>
<p><b>Kansen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Genoeg PHBV beschikbaar</li> <li>• Wereldwijd opschaalbaar</li> <li>• Wereldwijde duurzaamheidsdoelstellingen</li> <li>• Steeds meer interesse in biobased &amp; waste-based materialen</li> <li>• Aannemelijke business case in relatie tot andere PHA's</li> </ul>	<p><b>Bedreigingen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hogere prijs ten opzichte van fossiele alternatieven en biobased alternatieven</li> <li>• Huidige markt is nog gelimiteerd (weinig capaciteit)</li> <li>• Acceptatie van nieuw materiaal met nieuwe eigenschappen</li> <li>• Publieke acceptatie van waste-based materiaal</li> <li>• Verouderde wet en regelgeving</li> </ul>

# 5

## VETZUREN UIT ZUIVERINGSSLIB VOOR

### CALEYDA<sup>®</sup>

#### 5.1 INLEIDING

In hoofdstuk 2 is beschreven dat voor de productie van PHA (Caleyda<sup>®</sup>) zijn twee elementen cruciaal zijn:

1. Voldoende vetzuren omdat dit de grondstof is voor het maken van PHA;
2. Een actieve biomassa die deze grondstof om kan zetten in PHA,

De actieve biomassa kan specifiek opgekweekt worden waarvoor een deel van de grondstof (vetzuren) moet worden opgeofferd. Dit is de selectieaanpak. Een alternatieve aanpak is om gebruik te maken van secundair slib van een rioolwaterzuivering. In het eerdere PHARIO-project en ook bij de definitie van het PHA2USE-project lag de focus tot nu toe vooral op het gebruik van secundair slib als actieve biomassa waarbij dan externe, industriële vetzuurbronnen gebruikt kunnen worden om PHA te maken met deze actieve biomassa. De achtergrond hiervan was dat al eerder was geconcludeerd dat er nog veel uitdagingen waren in het maken van vetzuren uit het eigen slib. Een dergelijke insteek vergt echter wel dat er in de nabijheid van geschikte rioolwaterzuiveringen vetzuurrijke afvalwaterstromen zijn waarmee synergie is te vinden.

Daarom is gedurende het project een inventarisatie gemaakt van kansen voor het vinden van dergelijke stromen bij de deelnemende waterschappen. De resultaten hiervan worden besproken in paragraaf 5.2. Tegelijkertijd is er geconcludeerd dat het belangrijk is dat waterschappen ook vetzuren uit eigen slib zouden kunnen maken en inzetten voor PHA-productie omdat daardoor een groter eigen belang gediend kan worden. Daarom zijn extra onderzoeken uitgevoerd tijdens het project om meer inzicht te krijgen in de kansen en belemmeringen voor vetzuurproductie uit zuiveringsslib. De resultaten hiervan worden besproken in paragraaf 5.3 en vervolgens vergeleken met het alternatief: de productie van biogas via vergisting (paragraaf 5.4).

Dit hoofdstuk is geschreven vanuit het perspectief van de waterschappen. Vetzuur rijke stromen uit de industrie kunnen ook zonder de waterschappen worden omgezet in een PHA-rijk halffabricaat via de selectieaanpak. Dit is ook een belangrijke route waar Paques Biomaterials ook veel kansen ziet en actief mee bezig is. De kansen en belemmeringen hiervoor worden niet in dit hoofdstuk besproken.

#### 5.2 INDUSTRIËLE BRONNEN VOOR VETZUREN VOOR DE ACCUMULATIE AANPAK

Er is door AquaMinerals samen met De Dommel en Brabantse Delta een inventarisatie gedaan van de beschikbaarheid van externe vetzuurrijke stromen in de omgeving van rwzi Tilburg en rwzi Bath. Dit kunnen zowel lozingen zijn van grote industrieën op het rioolstelsel, bedrijven die voorzuiveren (en vaak zelf al biogas maken) als ook stromen uit de

handel in organische reststromen. Er is een analyse gemaakt welke bedrijven welk afvalwater lozen en er is gesproken met een aantal productiebedrijven (met voorzuivering) en enkele handelaren.

### 5.2.1 DIRECTE LOZINGEN

Allereerst is de conclusie getrokken dat het geloosde afvalwater van derden niet relevant is om een case op te bouwen. De grootste bedrijven loosden elk maar een paar procent van de behoefte aan vetzuren. Dit afvalwater wordt doorgaans op het rioolstelsel geloosd en er zijn geen separate pijpleidingen.

### 5.2.2 VOORZUIVERING (VAAK EIGEN BIOGAS PRODUCTIE)

Enkele bedrijven die zelf voorzuiverden zijn bezocht. Bij een groot aardappelverwerkend bedrijf nabij rwzi Tilburg (reeds aangesloten per pijpleiding maar niet meer in gebruik omdat ze het afvalwater na hun eigen UASB voorzuivering bij een gezamenlijke industriële awzi lozen), werd aangegeven dat er best interesse kon ontstaan voor productie van Caleyda® uit hun afvalwater. Dit zou echter hoger in de organisatie besproken moeten worden omdat er een afweging nodig is tussen verschillende belangen. Enerzijds dekt de biogasproductie nu een deel van hun eigen energieverbruik, anderzijds kan er best een behoefte zijn aan ontzorging van de awzi en dus verwerking van het afvalwater op de rwzi. Met enkele grote bedrijven in de omgeving van rwzi Bath is of wordt nog gesproken over het gebruik van hun vetzuurrijke afvalwater voor Caleyda® productie. Daar is mogelijk interesse maar ook daar speelt het argument dat het (deels) ten koste zal gaan van de inzet van biogas in de eigen productieprocessen. Kortom: er kunnen kansen liggen maar dit vereist een hele actieve projectontwikkeling, een uitstekende business en value case voor die bedrijven, en vooral commitment van de bedrijven zelf. Daarnaast zal er bij een samenwerking altijd afhankelijkheid zijn van de specifieke vetzuur bron.

Voor deze bedrijven is een indicatieve berekening gedaan van de waarde van het afvalwater voor Caleyda® productie als het moet concurreren met biogas in hun eigen processen (inclusief ETS waarde). De kosten van de vetzuren liggen, als we de verzonken investeringen in de biogasproductie niet meerekenen rond de € 0,17-0,27 per kg CZV VFA afhankelijk van de gasprijs, en dus ruim onder de kosten van het waterschap om met de huidige stand der techniek zelf vetzuren uit primair slib te maken (€ 0,38 per kg CZV VFA voor bijvoorbeeld Tilburg). Daarbij zijn eventuele meerkosten voor een pijpleiding niet meegerekend.

### 5.2.3 ORGANISCHE RESTROMEN UIT DE HANDEL

Tot slot is er ook gesproken met drie bedrijven die handelen in organische reststromen. Met een ervan heeft Paques Biomaterials een samenwerking voor een Caleyda®-fabriek in het noorden van Nederland. Op basis van gesprekken met deze en andere handelaren is onze verwachting dat de vetzuren van organische reststromen tussen de € 0 en € 0,20 per kg CZV VFA kosten geleverd aan rwzi Bath of rwzi Tilburg. De handelaren waren niet bereid om heel veel details te delen, dus het zijn grove, beeldvormende aannamen. Het goedkoopste zijn dunne stromen (tot ca. 10% ds) met veel opgelost CZV die ook snel omzetbaar zijn. Het is nog niet duidelijk en naar mening van AquaMinerals twijfelachtig of de beschikbaarheid van dunne stromen voldoende is om een grote fabriek op te ontwikkelen. De bovengrens is voor wat meer geconcentreerde stromen (10-30% ds) die ook niet in een paar dagen omzetbaar zijn naar vetzuren. De dikkere stromen zijn sowieso volop inzetbaar en worden nu doorgaans voor biogas ingezet bij vergisters. Ook de kosten voor stromen uit de handel zijn per kg CZV-VFA goedkoper dan de huidige productiekosten van vetzuren uit primair slib. Een

installatie bouwen die grotendeels gevoed wordt met rest/bijproducten is een risico omdat doorgaans geen lange termijncontracten mogelijk zijn. Dit risico kan gemitigeerd worden door een mede investering van de handelende partij.

Deze inventarisatie laat zien dat er beperkt kansen zijn voor het aantrekken van externe vetzuren uit de industrie. Deze stromen worden nu vaak benut voor de productie van biogas voor de eigen energievoorziening en dit wordt vaak als strategisch belangrijk gezien. Daarnaast kan diezelfde industrie deze vetzuur stromen ook zonder de waterschappen zelf omzetten in PHA-rijk halffabricaat via de zogenaamde “selectie” aanpak. Een oriënterende berekening door Sweco laat zien dat de PHARIO-aanpak van de waterschappen deze industrie geen grote kostenvoordelen biedt (zie 6.3). Wel kan het interessant zijn voor de industrie om de productie van PHA-rijk halffabricaat uit te besteden aan het waterschap en voor het waterschap kan dit interessant zijn omdat dit extra schaalgrootte biedt in combinatie met het omzetten van eigen vetzuren naar PHA. Meer concreet lijken er alleen reële kansen te zijn bij de rwzi Tilburg voor synergie met de afvalwaterlozing van een aardappelverwerkend bedrijf en eventueel voor een vergelijkbaar bedrijf bij Brabantse Delta.

Hoewel er dus kansen zijn, is het zeer onzeker of die kansen ook te benutten zijn. Daarom is het wel aan te bevelen om deze kans nader uit te werken, maar het lijkt onverstandig om samenwerking met de industriële stromen als vetzuurbron centraal te zetten in de strategie van de waterschappen.

### 5.3 ZUIVERINGSSLIB ALS VETZUURBRON

#### 5.3.1 LITERATUURONDERZOEK

De vetzuurproductie, de yield uitgedrukt in g VFA-CZV/g VSSaanvoer, is één van de parameters die een grote rol speelt bij het vaststellen van de haalbaarheid van PHA-productie. Het is dus belangrijk om een goede inschatting van deze yield voor primair en secundair slib te maken.

Om een beter inzicht te krijgen in de mogelijke opbrengsten van vetzuren uit zuiveringsslib is door zowel Dranco als Sweco een literatuurstudie uitgevoerd (bijlage 5 en 7). Uit het literatuuronderzoek van Sweco komt naar voren dat er vele factoren zijn die invloed hebben op de haalbare yield:

- Het uitgangsmateriaal dat wordt gebruikt. Over het algemeen kan worden gesteld dat hoe hoger het organische stofgehalte van de totale droge stof, hoe hoger de yield. Daarnaast is de samenstelling (proteïnen en koolhydraten) van belang.
- De temperatuur waarbij de verzuring plaatsvindt. Over het algemeen kan worden gesteld dat hoe hoger de temperatuur, hoe hoger de yield. Uit een aantal artikelen blijkt echter dat boven een temperatuur van 45 – 50 °C de yield niet verder toeneemt en in sommige onderzoeken zelfs afneemt. Veel onderzoeken zijn ook uitgevoerd bij omgevingstemperaturen van 10 – 20 °C.
- De pH. Er zijn veel onderzoeken waar de pH is gecorrigeerd, maar ook evenzoveel onderzoeken waarbij de pH niet is gecorrigeerd. Over het algemeen geldt hoe hoger de pH, hoe hoger de yield. Tevens blijkt uit een aantal onderzoeken dat in de pH range van 6-10 en langere verblijftijden de geproduceerde vetzuren worden omgezet naar methaan (methanogenese), terwijl juist bij hogere pH dit niet gebeurt. Het blijkt dat de methanogenese bij een pH>10, maar ook bij pH<6, wordt geremd.
- Concentratie van het uitgangsmateriaal: bij hoge concentraties van het uitgangsmateriaal ontstaan ook hoge concentraties aan vetzuren in de afloop van de verzuring waardoor

er productremming op kan treden. Er worden geen duidelijke maximale concentraties gerapporteerd maar er lijkt een grens te liggen bij 25.000 mg VFA-CZV/l.

- Verbleeftijd in de verzuringsreactor: over het algemeen wordt in de onderzoeken gewerkt met een doorstroomreactor waarbij de hydraulische verbleeftijd gelijk is aan de slibverbleeftijd. In een aantal onderzoeken wordt er slib gerecirculeerd naar de verzuringsreactor waardoor de slibverbleeftijd langer wordt dan de hydraulische verbleeftijd. Er blijkt geen duidelijk hogere yield bij een hogere slibverbleeftijd te zijn. Veel onderzoeken zijn uitgevoerd bij verbleeftijden tussen 1 – 15 dagen. Vaak wordt bij een verbleeftijd van 4-6 dagen al de maximale VFA-productie bereikt.
- Het gebruik van additieven (kaliumferraat) of entmateriaal (over het algemeen uitgegist slib).
- De conclusies van de Drancostudie zijn grotendeels in lijn met die van Sweco. Dranco benadrukt dat het waarschijnlijk vooral de hydrolysestap is die de bottleneck is voor de verzuring. Deze stap kan worden geoptimaliseerd door co-fermentatie of door een speciale voorbehandeling (bijvoorbeeld een thermische stap).

De vetzuurproductie is een eerste orde reactie en de samenstelling van het geproduceerde vetzuurmengsel is afhankelijk van de combinatie uitgangsmateriaal, pH, verbleeftijd en temperatuur. Over het algemeen is het gehalte aan azijnzuur en propionzuur het hoogste (30 – 40%) en zijn de butaanzuren (iso- en n-) en pentaanzuren (iso- en n-) in kleinere hoeveelheden (10 – 20%) aanwezig.

Vanwege het feit dat alle onderzoeken onder verschillende omstandigheden zijn uitgevoerd kan hieruit niet zomaar een gemiddelde yield voor primair en secundair slib worden afgeleid. Sweco concludeert op basis van haar onderzoek dat voor een temperatuur tussen 37 en 40 °C en een pH van rond de 6, yields haalbaar zijn voor primair slib en secundair slib zoals weergegeven in Tabel 5.

**TABEL 5 VERWACHTE HAALBARE OPBRENGSTEN VOOR VERZURING VAN PRIMAIR EN SECUNDAIR SLIB OP BASIS VAN LITERATUURONDERZOEK SWECO**

In g VFA CZV/g VS in	Primair slib	Secundair slib
Gemiddelde	0,29	0,22
Minimaal	0,20	0,03
Maximaal	0,34	0,42

### 5.3.2 LABPROEVEN

In opdracht van het PHA2USE-consortium heeft Dranco labproeven uitgevoerd om meer inzicht te krijgen in haalbare omzettingen van zuiveringslib in vetzuren (bijlage 7). Dranco heeft de proeven in twee stappen uitgevoerd. Allereerst zijn voor tien verschillende slibben van de betrokken waterschappen het VFA productie potentieel (VPP) bepaald. Deze slibben zijn zo gekozen dat zowel primaire als secundaire slibben vertegenwoordigd zijn en naar verwachting relevant zijn voor een toekomstige vetzuurproductie op grotere schaal.

Dranco gebruikt hiervoor een gestandaardiseerde batchtest waarbij het slib op pH=6 wordt gebracht en vervolgens anaeroob wordt weggezet bij een temperatuur van 37 °C. Tijdens de test wordt de gasproductie gemeten en op gezette tijden wordt de VFA-concentratie bepaald. Indien nodig wordt de pH steeds gecorrigeerd naar een waarde van 6. Het benodigde zuur of looggebruik wordt geregistreerd. Na afloop van de test is ook bepaald hoeveel biogas nog geproduceerd kan worden uit het residu.

Voor een beperkter aantal slibben (vier stuks) zijn ook continue testen uitgevoerd. Hierbij werd elke twee dagen 50% van het slib in een geroerde tankreactor (vijf liter) vervangen door vers slib gedurende een periode van vier weken. Doordat regelmatig slib wordt toegevoegd en afgevoerd kan er adaptatie van biomassa ontstaan met wellicht een positief effect op de omzetting. Ingroei van methanogenen in de biomassa is echter ook een risico en door de regelmatige afvoer van slib in een geroerde tank is er sprake van verlies van nog niet volledig omgezet slib hetgeen een negatief effect heeft op de omzetting.

Tenslotte zijn door Dranco ook twee testen uitgevoerd waarbij het slib zonder pH-correctie en bij kamertemperatuur was weggezet om te zien of hierdoor de verzuring significant minder goed zou zijn. Deze test was uitgevoerd vanwege plannen om op praktijkschaal slib van Bath of Nieuwveer te verzuren.

**TABEL 6** VETZUUR OPBRENGSTEN IN DE TESTEN MET VERZURING VAN ZUIVERINGSSLIBBEN DOOR DRANCO (G VFA CZV/KG VS)

Slib herkomst	Batch testen (35 °C, pH=6)	Continue testen (max) (35 °C, pH=5)	Koude testen (T=20 °C, geen pH correctie)
Flotatie slib Workum	627		
Primair Tilburg	546		
Primair slib Willem AnnaPolder	433	238	
A trap Nieuwveer	391		312
Primair Bath	330		352
Mengslib Mierlo (primair & secundair)	352	430	
TDH slib Tilburg	345	196	
Surplus slib Dordrecht	225		
Surplus slib Heerenveen	209	268	
Secundair slib Tilburg	172		

Tabel 6 vat de resultaten samen van de testen door Dranco. De tabel laat duidelijk zien dat primaire slibben een significant hogere vetzuuropbrengst hebben dan secundaire slibben bij de batchtesten. De variatie in opbrengsten van de primaire slibben is wel relatief groot wat suggereert dat het belangrijk is om experimentele data te hebben om de haalbaarheid van vetzuurproductie te kunnen inschatten voor een specifieke locatie. De opbrengsten liggen in de range die ook door Sweco uit de literatuur is bepaald waarbij opvalt dat de opbrengsten voor primair slib wat hoger lijken dan de waarden die in de literatuur werden gevonden.

De opbrengsten van de continutesten zijn in sommige gevallen hoger dan die van de batch testen en in sommige gevallen juist lager. De koude verzuringstesten laten geen significant lagere opbrengst zien dan bij de batchtesten.

Tegelijk met het PHA2USE-project vond STOWA-onderzoek plaats in het BioZang project waarbij op pilotschaal primair slib van de rwzi Oldenzaal werd verzuurd bij een verblijftijd van 3 dagen, een pH tussen 5,0-5,5 en een temperatuur van 32-37 °C<sup>6</sup>. In dit onderzoek werd een opgelost CZV-opbrengst gerapporteerd van 325 g opgelost CZV/kg VS bij een verzuringsgraad van 77-88%. Deze opbrengst is in lijn maar wel lager dan de opbrengsten die uit het Dranco onderzoek komen. Dit kan liggen aan de relatief korte verblijftijd, het type primair slib maar ook aan het feit dat ingroei van methanogenen op grotere schaal moeilijk is te voorkomen. In het STOWA onderzoek wordt dan ook een methaanproductie van 162 l biogas/kg VS gerapporteerd.

6 Zie STOWA rapport 2023-34, "Vetzuurproductie op rwzi's".

De resultaten van de batch testen zijn gebruikt in de door Sweco uitgevoerde haalbaarheidsstudies naar grootschalige PHA-productie. De gebruikte waarden wijken enigszins af van de waarden in de bovenstaande tabel doordat Dranco in eerdere versies van haar rapportage enkele berekeningsfoutjes had zitten.

### 5.3.3 PRAKTIJKPROEF OLDENZAAL

FIGUUR 16 PROEFOPSTELLING IN OLDENZAAL



Aan het einde van het PHA2USE-project is in samenwerking met waterschap Vechtstromen en Royal HaskoningDHV een praktijkproef uitgevoerd met het verzuren van primair slib van de rwzi Oldenzaal. Het voornaamste doel van deze praktijkproef was om in grotere hoeveelheden vetzuurrijk water van primair slib in te kunnen zetten voor PHA-productie in de PHA2USE-installatie in Dordrecht. Het bereiken van een hoge omzetting was geen doel van deze proef omdat het vanwege de schaalgrootte en budgettaire beperkingen niet mogelijk was om het slib te verwarmen tijdens de verzuring.

Voor de proef is gebruik gemaakt van twee gehuurde open containers van elk 100 m<sup>3</sup>. In de ene container is primair slib verzuurd. Deze container was niet afgedekt om ophoping van brandbare gassen te voorkomen. De andere container is gebruikt voor opslag van het centraat dat vrijkwam na ontwatering van het verzuurde primair slib. Voor de ontwatering werd gebruik gemaakt van een mobiele ontwateringsinstallatie (decanteercentrifuge).

De proef is opgezet als een batchverzuring waarbij de container gedurende een week gevuld werd met batches primair slib. Om een voldoende hoge drogestofgehalte te krijgen konden steeds alleen kleine batches gevoed worden omdat anders te dun slib uit de primair slib indikker werd getrokken. Nadat de tank gevuld was werd het slib 2 weken weggezet waarbij intermitterend werd gemengd met twee mengers. Kort voor de ontwatering werd een ijzerchloride oplossing toegevoegd om het opgelost fosfaatgehalte te verlagen tot circa 10 mg P/l. In totaal zijn vier batches ontwaterd waarbij alleen de laatste drie batches zijn gebruikt in Dordrecht. De eerste batch is niet gebruikt omdat de vetzuurconcentratie lager was dan gewenst en de zuurgraad erg laag was door een te hoge dosering van ijzerchloride.

De ontwatering vond plaats met een mobiele ontwateringscentrifuge. Hiervoor bleek het nodig een ander PE soort dan normaal te kiezen. Met het juiste PE kon een goede droge koek worden gemaakt met een drogestofgehalte van 26-29 %ds. Bij de eerste 3 batches werd een helder centraat verkregen. Alleen bij batch 4 lukte het niet goed om een helder centraat te krijgen. Bij deze laatste batch was een andere centrifuge gebruikt dan bij de andere batches.

TABEL 7 OVERZICHT BELANGRIJKSTE RESULTATEN VAN DE PRAKTIJKPROEF IN DORDRECHT

Batch	Start VFA	Eind VFA	Totaal opgelost CZV	Droge stof gehalte	Specifieke VFA opbrengst	Temp.	Verzuringgraad (gemeten in Oldenzaal)	Verzuringgraad (gemeten in Dordrecht)
	mg VFA CZV/l	mg VFA CZV/l	mg CZV/l	g/l	mg VFA CZV / g DS	°C	%VFA CZV / totaal CZV	%VFA CZV / totaal CZV
1	1250	2080	-	31	67	9	-	-
2	2040	3290	5540	50	65	11	58	96
3	1910	1980	4310	37	54	9	46	80
4	1830	4220	6690	29	145	17	63	105

Tabel 7 vat de belangrijkste resultaten van de verschillende verzuringen samen. Tijdens de eerste drie batches was de buitentemperatuur relatief laag in vergelijking met de laatste batch. De laatste batch gaf een duidelijk hogere VFA-opbrengst, waarschijnlijk vanwege deze duidelijk hogere temperatuur. Bij deze batch is het slib gedurende de proef ook versneden met een versnijder en ook dit kan een effect gehad hebben op de hogere vetzuuropbrengst. De specifieke vetzuuropbrengsten waren door de relatief lage temperaturen duidelijk lager dan in de Dranco proeven en bij de eerdere pilottest met het slib in Oldenzaal in het kader van eerder STOWA onderzoek.

De verzuringgraad zoals die gemeten werd in Oldenzaal was in de range van 50-60%. Opvallend is dat in Dordrecht bij het gebruik van de batches een veel hogere verzuringgraad werd gemeten. Mogelijk vond nog naverzuring plaats gedurende opslag en transport van het verkregen centraat. De vetzuur concentraties in Dordrecht en Oldenzaal werden door verschillende laboratoria gemeten (respectievelijk Eurofins en Industriewater Eerbeek) en dus is niet uit te sluiten dat ook de meetmethode invloed heeft.

In de PHA2USE-installatie in Dordrecht zijn zeven accumulaties uitgevoerd met het verkregen vetzuurrijke centraat. Deze accumulaties verliepen probleemloos ondanks de vetzuur concentraties die lager waren dan gehoopt. Er werd een PHA-rijk halffabricaat verkregen met een PHA-gehalte van 30-35% PHA/VSS. De PHA-yield kwam uit op ongeveer 0,25-0,3 kg PHA/kg VFA CZV (op basis van de vetzuur concentratie gemeten in Dordrecht) wat in lijn is met eerdere yields in het PHARIO-project. De PHA-yield kan nog worden verhoogd door de procesinstellingen tijdens een accumulatie nog verder te optimaliseren. Ook geldt dat bij een hoger VFA-gehalte een hoger PHA-gehalte bereikt kan worden doordat er naar verhouding minder slib gevormd wordt uit overig onopgelost CZV. De verhouding vetzuren/totaal CZV is dan gunstiger.

Flankerend aan de proeven zijn door Royal HaskoningDHV ook enkele eenvoudige labproeven (bij kamertemperatuur) uitgevoerd om de effecten van luchtinbreng, menging en versnijding te onderzoeken. Deze labproeven laten zien dat het voorkomen van contact met de lucht en niet of beperkt mengen een positief effect hebben op de vetzuurproductie. Versnijden van het slib leek juist een negatief effect te hebben. Deze labproeven lieten ook duidelijk hogere vetzuuropbrengsten zien (140-410 g VFA CZV/kg ds, gemiddeld 260 g VFA/kg ds), vermoedelijk door de gemiddeld hogere temperatuur dan bij de praktijkproef en de betere anaerobe omstandigheden.



### 5.3.4 CONCLUSIE

De beschreven onderzoeken hebben meer inzicht gegeven in de mogelijkheden om vetzuren te produceren uit zuiveringsslib. De resultaten laten zien dat primair slib een duidelijk hogere opbrengst (bijna factor 2) heeft dan wanneer secundair slib of surplusslib wordt gebruikt. Tegelijkertijd laten de resultaten ook zien dat de daadwerkelijke opbrengst afhangt van de slibsoort en de manier waarop de proef wordt uitgevoerd. Op basis van de verkregen informatie zijn aannames gemaakt over haalbare opbrengsten die vervolgens zijn gebruikt in haalbaarheidsstudies voor de productie van PHA (zie volgend hoofdstuk). In dit stadium zijn deze aannames voldoende nauwkeurig maar aanbevolen wordt om aanvullende langdurige proeven te doen met de beoogde slibben voor verzuring voordat investeringsbeslissingen worden genomen.

## 5.4 PRODUCTIE VAN VFA EN PHA VERSUS BIOGASPRODUCTIE

Wanneer vetzuren uit zuiveringsslib worden gebruikt voor de productie van PHA, dan zal dit ten koste gaan van de productie van biogas uit dit slib. Biogas wordt immers ook verkregen via fermentatie van het slib waarbij de productie van vetzuren een tussenstap is naar de vorming van biogas. In theorie zouden dan ook evenveel vetzuren als biogas gemaakt kunnen worden (uitgedrukt in massa). In de praktijk is de productie en winning van vetzuren echter significant minder doordat de geproduceerde vetzuren zorgen voor een verlaging van de pH van het slib waardoor de productie geremd wordt. Bij de productie van biogas worden deze vetzuren continu weggenomen zodat deze remming niet optreedt. Het is daarom belangrijk om te kijken hoe de productie van vetzuren en PHA zich verhoudt tot de productie van biogas.

Om dit in beeld te brengen is een vergelijking gemaakt tussen de potentiële opbrengsten uit biogas versus de opbrengsten uit vetzuurproductie. Voor deze vergelijking is een standaard rwzi met voorbezinking genomen van 100.000 i.e. met slibproducties zoals beschreven in de STOWA slibketenstudie (rapport 2005-26)<sup>7</sup>. Daarnaast is dezelfde berekening gedaan voor de slibproducties van de rwzi Bath zoals die ook in de Sweco-studie (zie paragraaf 6.2) zijn gehanteerd.

Voor de vetzuuropbrengsten zijn de volgende (conservatieve) waarden aangenomen:

Primair slib:	0,35 kg VFA CZV/kg organische stof
Secundair slib:	0,20 kg VFA CZV/kg organische stof

Verder is aangenomen dat 80% van deze vetzuurproductie kan worden bereikt en dat het restant achterblijft in het slibresidu voor ontwatering en nog beschikbaar is voor biogasproductie door navergisting. Een deel van het secundair slib gebruikt wordt om PHA te kunnen accumuleren (PHARIO-aanpak) zodat een PHA-rijke biomassa met 40% PHA per kilogram organische stof wordt verkregen.

De onderstaande tabel vergelijkt de opbrengst uitgedrukt in CZV voor biogas en vetzuren. Deze berekening laat zien dat met de kennis van nu slechts 30% van de via vergisting afbreekbare CZV kan worden gewonnen als vetzuren. Als iets optimistischere vetzuuropbrengsten worden aangenomen (respectievelijk 0,45 en 0,25 kg VFA CZV/kg organische stof, resp.) neemt dit percentage toe tot ongeveer 35-38%. In theorie zou alle CZV die via biogasproductie benut wordt ook als vetzuren gewonnen moeten kunnen worden. Hier ligt dus nog

<sup>7</sup> Er is gerekend met zowel chemische als biologische fosfaatverwijdering in het slibketenmodel. Dit leverde geen significant verschil op in berekeningsresultaat.

een heel groot potentieel voor verbetering. De berekening laat echter wel zien dat het zinvol zal zijn om het slibresidu dat overblijft na de productie van vetzuren nog na te vergisten. Dit levert dan nog een significante biogasproductie en slibreductie op.

**TABEL 8 VERGELIJKING CZV-OPBRENGST VOOR BIOGAS EN VOOR VETZUREN**

	Eenheid	Slibproductie STOWA Slibketen studie	Slibproductie rwzi Bath
Methaan in biogasproductie bij slibgisting	g CZV/kg org. stof in	720	647
Vetzuurproductie voor PHA-productie (winbaar)	g CZV/kg org. stof in	200	192

Hoewel de opbrengst van vetzuren in kilogrammen dus lager is dan de productie van biogas is de waarde van deze opbrengst wel significant hoger als deze kan worden omgezet in een PHA-rijk halffabricaat. Tabel 9 hieronder vergelijkt de waarde van de PHA-productie met die van de productie van biogas. Daarbij is de waarde van methaan in het geproduceerde biogas gewaardeerd op 0,35 €/Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> (zoals aangenomen in de Sweco-studie) en eventuele GVO-opbrengsten zijn niet meegenomen. De waarde van PHA in het geproduceerde PHA-rijk halffabricaat is aangenomen als 2 €/kg PHA in het halffabricaat<sup>8</sup>.

**TABEL 9 VERGELIJKING FINANCIËLE WAARDE VOOR BIOGAS EN VOOR PRODUCTIE VAN PHA MET NAVERGISTING VAN HET VERZURINGSRESIDU (NB: NOG EXCLUSIEF OPERATIONELE KOSTEN EN INVESTERINGEN)**

	Eenheid	Slibproductie STOWA Slibketen studie	Slibproductie rwzi Bath
Biogas productie bij slibgisting	€/kg org. stof in	88	79
PHA-productie	€/kg org. stof in	135	127
Biogasproductie uit navergisting	€/kg org. stof in	63	56
Totaal	€/kg org. stof in	198	183

De berekening laat zien dat door de productie van vetzuren en PHA de potentiële opbrengsten meer dan twee keer zo groot kunnen worden ten opzichte van de situatie met alleen biogasproductie. Hiervoor moeten dan wel extra investeringen worden gedaan en er worden extra operationele kosten gemaakt voor de productie van het PHA-rijke halffabricaat. In de berekening is geen rekening gehouden met extra inkomsten voor bijvoorbeeld de verhandeling van groencertificaten voor de productie van biogas. Op dit moment zijn er nog geen financiële stimuleringsmaatregelen voorzien voor productie van afbreekbare polymeren. Niettemin lijkt de toegevoegde maatschappelijke waarde van de productie van een plasticvervanger groter dan de productie van een energiedrager als biogas. Voor de productie van hoogwaardige biobased polymeren is de hoeveelheid beschikbare grondstof immers schaars, terwijl er voor energieproductie ook alternatieven zijn voor biogas.

## 5.5 KANSEN VOOR INNOVATIE IN VETZUURPRODUCTIE UIT SLIB

De voorgaande analyses zijn steeds gebaseerd op de klassieke manier van vetzuurproductie uit zuiveringsslib, namelijk door het slib te verzuren bij een pH rond 6 en een temperatuur van ca. 35 °C. De reden hiervoor is dat van deze aanpak meer bekend is en dat de benodigde investeringen goed in te schatten zijn, waardoor deze aanpak de kortste route is naar de productie van vetzuren op grote schaal.

<sup>8</sup> De marktwaarde van het PHA na extractie in de vorm van Caleyda<sup>®</sup> is veel hoger. Het gaat hier echter om de waarde van het PHA in het halffabricaat, dus voor extractie.

In de literatuur worden echter ook andere aanpakken beschreven om vetzuren te produceren. Een veel beschreven route is om de verzuring uit te voeren bij een hoge pH (> 10). Op deze manier kan een significant hogere vetzuuropbrengst worden verkregen doordat er geen remming van de vetzuurproductie optreedt door de geproduceerde vetzuren. Een belangrijk nadeel is echter het hoge loogverbruik dat hier mee gemoeid is waardoor deze aanpak nog niet haalbaar lijkt. Door Wageningen Universiteit is in een TKI-project deze aanpak getest in combinatie met een thermische hydrolyse waarbij het loog teruggewonnen wordt met behulp van elektrolyse<sup>9</sup>. In dit onderzoek werd een hele hoge conversies (>60%) van de organische stof naar vetzuren (met name azijnzuur) aangetoond. Het ontwikkelingsniveau van deze techniek is op dit moment echter nog onvoldoende om al te kunnen investeren in een grootschalige installatie.

Ander onderzoek van STOWA laat zien dat de Torwashtecnologie ook veel potentie heeft om grote hoeveelheden vetzuren uit zuiveringsslib te produceren<sup>10</sup>. Pilotonderzoek op vergist en onvergist slib laat een hoge afbraak van meer dan 50% zien van de organische stof door deze thermochemische behandeling (bij een temperatuur van rond de 200 °C) waarbij als grootste voordeel een zeer goed ontwaterbare slibkoek wordt verkregen. Vanuit het oogpunt van PHA-productie is het interessant dat de organische stof die door dit proces in oplossing gaat grotendeels wordt omgezet in opgelost CZV waarvan verwacht mag worden dat deze verder omgezet kan worden in vetzuren. Het pilotonderzoek liet zien dat in ieder geval een groot deel om te zetten is naar biogas en dus zeer waarschijnlijk ook naar vetzuren. Het eerder beschreven onderzoek van Dranco liet zien dat de oplosbare CZV die verkregen werd via de thermische druk hydrolyse van het slib van Tilburg grotendeels om te zetten was in vetzuren. De Torwashtecnologie moet nog verder opgeschaald worden en daardoor zal het nog enige jaren kosten voordat waterschappen op deze manier het produceren van vetzuren kunnen testen. Wel zijn er ook vergelijkbare hydrothermale carbonisatie technieken (zoals C-Green) die mogelijk een vergelijkbaar potentieel kunnen bieden als Torwash en al iets verder in de ontwikkeling zijn.

Dit zijn slechts twee voorbeelden van mogelijkheden hoe door verdere innovaties in de toekomst meer vetzuren kunnen worden geproduceerd uit zuiveringsslib. Binnen het project was er geen tijd en ruimte om dergelijke ontwikkelingen meer in detail te verkennen maar er lijkt dus potentie om via verder onderzoek en ontwikkeling de vetzuuropbrengst verder te verhogen in de toekomst.

## 5.6 CONCLUSIE

Dit hoofdstuk beschrijft de kansen en belemmeringen voor waterschappen om vetzuren te verkrijgen via samenwerking met industriële lozers dan wel door deze vetzuren zelf te produceren uit het zuiveringsslib. Het onderzoek laat zien dat er weliswaar kansen zijn voor synergie met industriële lozers maar dat het hierbij gaat om slechts enkele unieke locaties. Bovendien hebben de potentiële samenwerkingspartners ook de mogelijkheid om zonder waterschap hun vetzuren te verwerken. Daarom lijkt het verstandiger voor waterschappen om zich meer te richten op de productie van vetzuren uit eigen slib waarbij eventuele kansen voor synergie met industriële lozers zeker in beeld moet blijven.

<sup>9</sup> Van Groenestijn, Johan, Tania Mubita, and Roel Bisselink. Productie van vluchtige vetzuren uit actief slib en bermgrassap. No. 2367. Wageningen Food & Biobased Research, 2022

<sup>10</sup> Zie STOWA rapport 2020-26.

De onderzoeken die in PHA2USE zijn uitgevoerd hebben een beter inzicht gegeven in de haalbare opbrengsten van vetzuren uit primair en secundair slib. Deze onderzoeken laten zien dat in vergelijking met slibgisting de conversie van de organische stof naar vetzuren ongeveer 30-40% lager is dan wanneer diezelfde organische stof omgezet wordt naar biogas. Daarom lijkt een combinatie van vetzuurproductie en navergisting nodig omdat anders de slibreductie onvoldoende is. Vanuit financieel oogpunt kan een combinatie van vetzuurproductie, PHA-accumulatie en navergisting leiden tot potentiële opbrengsten die meer dan 2 keer zo groot zijn als bij vergisting alleen. Daar staan wel extra investeringen en operationele kosten tegenover. In een haalbaarheidsstudie (zie volgende hoofdstuk) zijn deze kosten verder uitgewerkt.

In het project zijn op grote schaal vetzuren uit zuiveringsslib gemaakt en ingezet voor de productie van PHA. In vergelijking met andere vetzuurbronnen uit de industrie verliep de omzetting naar PHA uitstekend en werden geen significante belemmeringen gevonden in de omzetting naar PHA. Deze resultaten bevestigen de eerdere resultaten die in het pilotonderzoek van het PHARIO-project werden bereikt.

Er lijkt nog veel potentieel te zijn om door verder innovatie de opbrengsten aan vetzuren te verhogen. Hier zullen waterschappen dan wel actief onderzoek naar moeten laten uitvoeren.

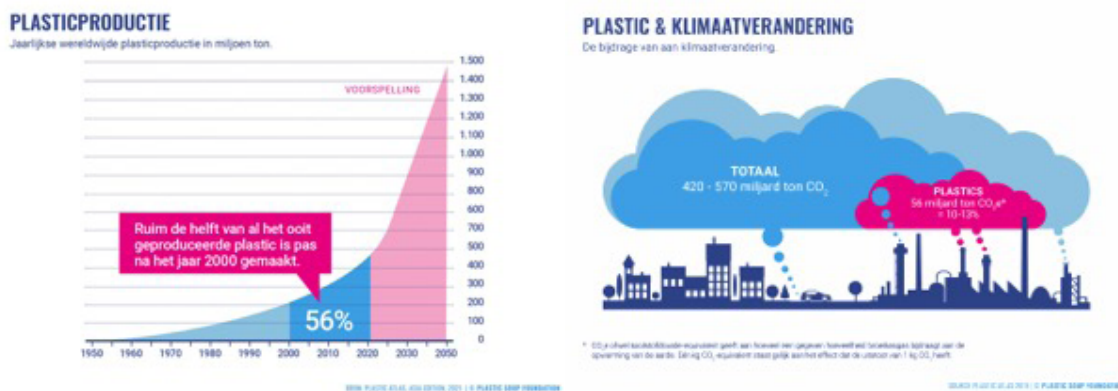
## 6

## WAARDECASE VOOR CALEYDA®

## 6.1 HET PLASTICPROBLEEM EN ZORGEN RONDOM MICROPLASTICS

De productie en het gebruik van plastics in onze samenleving heeft een enorme vlucht genomen. Dit gebruik knelt echter in toenemende mate. Zo vormt de productie van fossiele plastics een grote bijdrage aan de broeikasemissies in de wereld.

FIGUUR 17 LINKS: TOENAME VAN DE PLASTICPRODUCTIE IN DE WERELD EN RECHTS: RELATIEVE BIJDRAGE VAN DE PLASTICPRODUCTIE AAN DE UITSTOOT VAN BROEIKASGASSEN (BRON: PLASTIC SOUP FOUNDATION/PLASTIC ATLAS)



Een bijkomend probleem is de steeds grotere verspreiding van plastic en met name microplastics in ons milieu. Onze samenleving wordt zich steeds meer bewust dat dit een groot potentieel milieu en gezondheidsrisico vertegenwoordigt.

Vanuit het PHA2USE-project is in samenwerking met InvestNL onderzocht of dit effect te kwantificeren is en of het aannemelijk is dat gebruik van PHA als plasticvervanger de verspreiding van microplastics kan tegengaan. Hiervoor is het Noorse onderzoeksinstituut NORSUS benaderd. In hun rapportage<sup>11</sup> concluderen zij op basis van een literatuuronderzoek dat er een hoog risico is dat microplastics een impact hebben op ecosystemen en menselijk leven. Zo zijn microplastics bijvoorbeeld aangetoond in de wortels van tarweplanten<sup>12</sup>. Het risico is echter nog niet kwantificeerbaar door een gebrek aan kwantitatieve data die informatie geven over massastromen en effecten. Daardoor kan dit risico tot nu toe niet meegenomen worden in LCA-studies. Zij concluderen verder dat het risico door gebruik van PHA-plasticvervangers aanzienlijk lager is.

11 Norsus, 2023, PHA from wastewater: a promising strategy for reducing microplastic and microplastic emissions, ISBN 978-82-7520-908-3. Downloadbaar via: <https://norsus.no/en/publikasjon/pha-from-wastewater-a-promising-strategy-for-reducing-microplastic-and-macroplastic-emissions/>

12 Li, Lianzhen, et al. "Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode." *Nature sustainability* 3.11 (2020): 929-937

## 6.2 PRODUCTIE VAN PHA-RIJK HALFFABRICAAT BIJ WATERSCHAPPEN

Gedurende het PHA2USE-project hebben de betrokken waterschappen onderzocht hoe zij de productie van het halffabrikaat voor Caleyda® vorm kunnen geven op concrete locaties bij de betrokken waterschappen. Hiervoor is ingeschat welke locaties het meeste potentieel hebben en voor de locaties is onderzocht hoe groot de productie kan zijn en welke investeringen en operationele kosten daar mee gemoeid zijn.

Uitgangspunt voor de studies is steeds geweest dat het PHA volledig uit eigen slib wordt gemaakt en dat er dus geen industriële bronnen voor vetzuren worden gebruikt. De waterschappen zijn daardoor niet afhankelijk van externe stromen voor de haalbaarheid. Een nadeel is wel dat het maken van vetzuren uit primair slib met de huidige stand der techniek en zonder optimalisaties duurder is dan het maken van vetzuren uit andere industriële stromen.

Deze studie is uitgevoerd voor de volgende locaties:

1. rwzi Dordrecht, waterschap Hollandse Delta;
2. rwzi Tilburg, waterschap De Dommel;
3. rwzi Bath, waterschap Brabantse Delta incl. slib van rwzi Willem Annapolder, waterschap Scheldestromen;
4. rwzi Heerenveen van Wetterskip Fryslân.

Allereerst is er een studie uitgevoerd voor de rwzi Dordrecht door Witteveen+Bos (bijlage 9). Deze studie liet zien dat de rwzi Dordrecht in potentie 620 ton PHA zou kunnen maken. De benodigde investering was met 63 M€ echter te hoog waardoor de kostprijs per kg PHA te hoog uitviel (> 5€/kg PHA in het halffabrikaat bij 30 jaar afschrijving). Analyse van de situatie in Dordrecht liet zien dat deze locatie niet de meest geschikte locatie is voor de stand der techniek zoals die nu is doordat er geen primair slib beschikbaar is op de locatie en er geen navergisting van het verzuurde slib mogelijk is.

Na deze studie is door Sweco een vervolgstudie uitgevoerd naar de overige locaties. Daarbij zijn bij de opzet van de processchema's nieuwe inzichten meegenomen die de opbrengst van vetzuren zouden moeten verhogen. Per locatie zijn ook een aantal varianten doorgerekend om het effect van verschillende aannames en gevoeligheden te evalueren. De onderstaande tabel geeft een overzicht van alle scenario's die zijn doorgerekend.

TABEL 10 OVERZICHT VAN DE DOOR SWECO DOORGEREKENDE SCENARIO'S

Locatie	Scenario naam	Productie PHA-rijk halffabricaat (in ton PHA/j)	Toelichting op het scenario
Tilburg	Tilburg 1	2161	Al het inkomende slib wordt eerst omgezet in vetzuren en daarna na een behandeling in de bestaande TDH en vergisting navergist. Het slib bestaat uit een mengsel van primair en secundair slib.
	Tilburg 1A	1071	Als variant 1, maar voor de ontwatering van de verzuurde slibmassa worden de bestaande vooronwateringscentrifuges gebruikt. Hierdoor kan minder slib worden omgezet in vetzuren.
	Tilburg 1B	2161	Als variant 1, de vrijkomende capaciteit in de gisting wordt opgevuld met nieuw aan te trekken extern slib zodat de biogasproductie op peil blijft.
	Tilburg 2	1736	Al het inkomende slib wordt eerst behandeld in de bestaande TDH, dan verzuurd en vervolgens navergist. Het slib bestaat uit een mengsel van primair en secundair slib.
Bath	Bath 1	704	Al het slib van Bath (primair en secundair slib) wordt omgezet in vetzuren en bovendien wordt primair slib aangevoerd van de rwzi Willem Annapolder (Scheldestromen) en suikerwater van Cloetta dat nu naar de rwzi Nieuweer gaat.
	Bath 2	704	Gelijk aan 1 maar nu wordt geen nieuwe verzuringsreactor gebouwd. In plaats daarvan wordt één van de bestaande gistingstanks hiervoor gebruikt.
	Bath 2A	518	Nu wordt alleen primair slib en suikerwater van Cloetta gebruikt voor de productie van vetzuren.
	Bath 2B	586	Als variant 2A maar bij de ontwatering van het verzuurde slib wordt het slib verdund om meer vetzuren te kunnen terugwinnen.
Heerenveen	Heerenveen 1	830	In dit scenario wordt al het surplus slib van Heerenveen (geen primair slib) en het extern aangevoerde slib naar Heerenveen (voornamelijk surplus slib) omgezet in vetzuren. Verdere wordt ook een slibstroom van Friesland Campina gebruikt voor de verzuring die nu naar Leeuwarden wordt afgevoerd. Er is geen navergisting van het slib.
	Heerenveen 1A	796	Als 1 maar nu wordt de bestaande ontwatering gebruikt voor de ontwatering van het verzuurde slib.
	Torwash H'veen	1496	In deze variant wordt het slib eerst met de Torwash techniek behandeld en ontwaterd. Het opgelost CZV in het rejectiewater wordt omgezet naar vetzuren voor PHA-productie.

Omwille van vertrouwelijkheid van de gegevens kunnen de resultaten van de kostenberekeningen niet in dit rapport gedeeld worden. Deze zijn wel op verzoek en op individuele basis beschikbaar voor waterschappen die mee willen investeren in deze verdere ontwikkeling van de productie van Caleyda uit zuiveringsslib.

Wel kunnen de volgende algemene conclusies uit de Sweco-studie worden gedeeld.

- Het maken van vetzuren uit slib is een belangrijke kostenpost (bijna 50% van de totale kosten). Beschikbaarheid van primair slib is belangrijk voor een sterke business case. Deze is daarom het beste voor de locaties Tilburg (De Dommel) en Bath (Brabantse Delta). Tegelijkertijd laten de deelstudies die in het project zijn uitgevoerd zien dat er nog belangrijke onzekerheden zijn in de haalbare omzetting naar vetzuren.
- Door innovatie kan in de toekomst de business case voor de productie van vetzuren flink gunstiger worden, ook uit secundair slib (zoals in Heerenveen of Dordrecht). Hiervoor biedt een hydrothermale behandeling zoals bijvoorbeeld Torwash een interessant perspectief. Deze techniek is wel nog in ontwikkeling en er loopt op dit moment een demonstratie bij Waterschap Aa en Maas.
- De productie van vetzuren gaat ten koste van de productie van biogas. De productie van biogas wordt sterk gestimuleerd en financieel gesubsidieerd en de productie van PHA (nog) niet. Hierdoor is er sprake van een ongelijk speelveld en dit heeft een negatief effect op de financiële haalbaarheid voor de productie van PHA (effect is 5-10% van de marktprijs voor PHA).
- Met de huidige stand der techniek kan het PHA-rijk halffabricaat gemaakt worden tegen

een acceptabele kostprijs bij een voldoende grote schaal zoals in Tilburg. Voor een kleinere schaal (zoals bij Bath) neemt de kostprijs toe met bijna een factor twee. Hierbij is rekening gehouden met een normale afschrijving en 4% rente op kapitaal. Bovendien is aangenomen dat de vrijkomende capaciteit in de gisting weer opgevuld kan worden.

- De productie van PHA-rijk halffabricaat op een rwzi vergt een significante investering (ca. 34 M€ voor Tilburg, ca. 22 M€ voor Bath) die terugverdiend moet worden met verkoop van het PHA-rijk halffabricaat. Hier zijn risico's aan verbonden en daarom is het verstandig om te rekenen met kortere terugverdiëntijden en hogere rentes op kapitaal. Als uitgegaan wordt van een netto contante waarde van 0 na 10 jaar en een rente van 8%, neemt de benodigde transactie prijs voor het PHA-rijk halffabricaat zodanig toe dat de transactieprijs aan de bovenkant van de acceptabele bandbreedte uitkomt.
- Subsidies op de investering of exploitatie (bijvoorbeeld ook GVO op PHA) kunnen de transactieprijs verlagen met bijna 5-10% van de marktprijs voor PHA.
- Nieuwe ontwikkelingen die de opbrengst aan vetzuren uit slib kunnen vergroten, zoals bijvoorbeeld de Torwash ontwikkeling, hebben de potentie om de kostprijs voor de productie van PHA significant te verlagen.

Op basis van dit onderzoek (met een focus op de PHARIO-aanpak) kan geconcludeerd worden dat er op termijn een haalbare business case is voor waterschappen om PHA te maken uit hun eigen slib. Wel zijn forse investeringen nodig en kapitaallasten vormen daardoor een groot onderdeel van de kostprijs. Er is ook oriënterend onderzocht of een selectieaanpak financieel interessanter kan zijn. In die situatie wordt iets minder PHA gemaakt maar de investering valt significant lager uit doordat het proces dan continu kan plaatsvinden, terwijl nu een batch aanpak is ontworpen voor de PHARIO-aanpak. Deze aanpak is in PHA2USE niet getest maar het is wel aan te bevelen om dit in vervolgstappen nader te onderzoeken.

De business case is positief voor zuiveringen die beschikken over een voorbezinking en wanneer er mogelijkheden zijn om de vrijkomende gistingcapaciteit voor slib weer op te vullen. In deze studies is rekening gehouden met een verlies aan energiesubsidies doordat de productie van PHA de productie van biogas verlaagt. Als de productie van PHA eenzelfde mate van stimulering zou krijgen als die van groen gas zou de business case voor meer rioolwaterzuiveringen positief uitpakken. Ook kan verdere ontwikkeling van de techniek gericht op het verhogen van de vetzuurproductie en verlagen van de investeringskosten de business case verbeteren en daardoor haalbaar maken voor meer rioolwaterzuiveringen.

### 6.3 SELECTIE VERSUS PHARIO-AANPAK

De waterschappen hebben zich in de tot nu toe meestal gericht op de PHARIO-aanpak voor de productie van PHA omdat hierdoor een manier ontstaat om het secundaire slib te verwaarden als een actieve biomassa. Zoals omschreven in hoofdstuk 5 is gedurende het project de focus meer komen te liggen op de productie van vetzuren uit eigen slib voor de productie van PHA. Deze vetzuren kunnen dan via de PHARIO-aanpak worden omgezet in een PHA-rijk halffabricaat. Er bestaat echter ook de mogelijkheid om deze vetzuren via de selectieaanpak om te zetten in PHA-rijk halffabricaat. Door de samenwerking met Paques Biomaterials is deze aanpak ook meer in beeld gekomen. De theoretische voor- en nadelen van beide aanpakken zijn in Tabel 11 samengevat.



TABEL 11 VERGELIJKING VAN DE PHARIO EN SELECTIE AANPAK

PHARIO-aanpak	Selectie aanpak
<p>Voordelen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Potentieel hogere PHA-productie doordat een groter deel van de vetzuren omgezet wordt in PHA, dus efficiënter gebruik van grondstoffen.</li> <li>• Meer slibreductie doordat secundair slib afgezet wordt als waardevol PHA-rijk halffabricaat</li> </ul> <p>Nadelen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lagere PHA-gehaltenes in het PHA-rijk halffabricaat</li> <li>• Meer verontreinigingen in het PHA-rijk halffabricaat</li> </ul>	<p>Voordelen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hogere PHA-gehaltenes in het halffabricaat en daardoor minder energie nodig voor droging van het PHA-rijk halffabricaat.</li> <li>• Continue procesvoering waar PHARIO een batchgewijze aanpak vergt</li> <li>• Schoner PHA-rijk halffabricaat en daardoor mogelijk minder problemen met einde-afval status</li> </ul> <p>Nadelen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Een deel van de grondstof (vetzuren) is nodig om een actieve biomassa op te kweken.</li> <li>• Dosering van nutriënten is soms nodig voor de biomassakweek</li> </ul>

Om te onderzoeken hoe deze verschillen zich vertalen naar de economische haalbaarheid is door Sweco voor de case Tilburg een oriënterende vergelijking gemaakt waarbij in plaats van de PHARIO-aanpak een selectie aanpak is doorgerekend (bijlage 6).

Deze berekening laat zien dat de selectieaanpak weliswaar minder PHA produceert maar dat de investering 25-30% lager uitvalt. Mede daardoor zijn ook de operationele kosten 30% lager zijn per kilogram PHA. Dit resultaat laat zien dat de hogere PHA-productie van de PHARIO-aanpak mogelijk niet opweegt tegen de lagere investeringskosten voor de selectie aanpak.

Wel moet aangetekend worden dat deze vergelijking erg gevoelig is voor aannames die worden gedaan zoals de omzetting van vetzuren naar PHA, het te bereiken PHA-percentage in het halffabricaat en het ontwateringsresultaat. Bovendien zijn beide aanpakken nog in ontwikkeling. Er is nog weinig ervaring is met de selectie aanpak voor vetzuren uit rwzi-slib in het project. Deze aanpak is nog niet eerder getest in Nederland. In andere pilot-projecten in Europa is dit wel gedaan (WOW project, Smartplant) en die projecten laten zien dat deze aanpak in principe mogelijk is, maar de condities en resultaten zijn moeilijk vergelijkbaar.

Er lijkt dus een voorzichtig voordeel te zijn voor de selectieaanpak en in ieder geval geen sterk en doorslaggevend voordeel voor de PHARIO-aanpak. Het is daarom aan te bevelen meer aandacht te besteden aan de kansen voor de selectie aanpak.

#### 6.4 EXTRACTIE VAN PHA-RIJK HALFFABRICAAT

Aan het begin van het PHA2USE-project is door het Proces Design Center een conceptuele ontwerpstudie uitgevoerd naar realisatie van een continue extractie faciliteit voor de verwerking van 6000 ton/j PHA uit een halffabricaat met 40% PHA in de biomassa. Het achterliggende rapport is vertrouwelijk maar inzichtelijk voor waterschappen die willen investeren in deze ontwikkeling. De studie liet zien dat een dergelijke installatie een significante investering vergt en dat de kosten voor extractie passen bij de beoogde waardecase.. In deze studie zijn ook verbruiken van chemicaliën en energie bepaald die gebruikt zijn voor de LCA-studie (zie paragraaf 6.5). In de studie is tevens een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Deze gevoeligheidsanalyse liet zien dat:

- De schaalgrootte een grote invloed heeft. Verlaging van de capaciteit naar 2000 ton/j PHA leidt tot een toename van de verwerkingskosten met ruim 80% terwijl verdere schaalvergroting tot 10.000 ton/j de kosten met 20% verlaagt. De gekozen schaalgrootte van 6000 ton/j lijkt daarom minimaal nodig om een kosteneffectieve extractie te kunnen realiseren.

- De kosten zijn niet erg gevoelig voor het PHA-gehalte in de biomassa. Als het PHA-gehalte toeneemt tot 70% dalen de extractiekosten met ongeveer 9%.
- Materiaalkeuzes hebben een grote invloed op de investeringskosten.

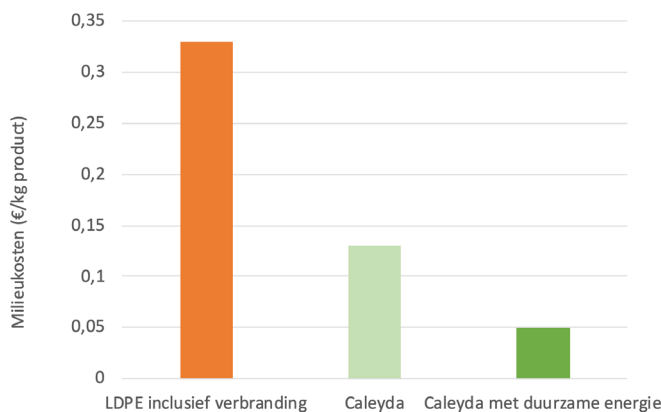
Na deze studie is Paques Biomaterials verdergegaan met het uitwerken van het ontwerp van de extractiefaciliteit samen met andere ingenieursbureaus waarbij lessen van deze haalbaarheidsstudie zijn meegenomen. Deze vervolgstudies maakten geen onderdeel uit van het PHA2USE-project en zijn vertrouwelijk.

In een toekomstige waardenketen zal Paques Biomaterials verantwoordelijk zijn voor de extractie en de afzet van het materiaal. Waterschappen en andere industriële partners zullen een PHA-rijk halffabricaat maken die zijn verkopen aan Paques Biomaterials. De waarde van dit PHA-rijk halffabricaat is belangrijk voor zowel de businesscase van de extractie en voor de productie van het PHA-rijk halffabricaat. In het PHA2USE-project hebben de waterschappen, HVC en Paques Biomaterials afspraken gemaakt over hoe de prijsvorming van dit halffabricaat in de toekomst tot stand zou moeten komen.

## 6.5 RESULTATEN LCA-STUDIE

Parallel aan het PHA2USE-project heeft door STOWA een levenscyclusanalyse laten uitvoeren door CE Delft voor de verschillende grondstoffen die de waterschappen kunnen terugwinnen<sup>13</sup>. Vanuit het PHA2USE-project zijn gegevens aangeleverd die door CE Delft als uitgangspunt zijn genomen voor de berekeningen. De berekeningen zijn gebaseerd op de PHARIO-aanpak. Figuur 19 hieronder geeft het resultaat van deze analyse waarbij de milieupact is uitgedrukt in milieukosten.

FIGUUR 19 RESULTATEN LCA ANALYSE VOOR CALEYDA® IN VERGELIJKING MET LDPE FOLIE



Deze studie laat zien dat de milieukosten voor het maken van een kilogram Caleyda® 60% lager zijn dan voor fossiel plastic (LDPE folie) waarbij er rekening mee is gehouden dat het plastic uiteindelijk verbrand zal worden. De milieukosten voor de productie van PHA worden voornamelijk veroorzaakt door klimaat-effect als gevolg van het energieverbruik voor de droging en extractie van het halffabricaat. Als aangenomen wordt dat hiervoor duurzame elektriciteit en warmte kan worden ingezet dan zijn de milieukosten voor PHA 15% van die van fossiel plastic. Voor de beoogde extractielocatie heeft Paques Biomaterials bewust gekozen voor een industriepark bij Emmen waar een goede beschikbaarheid is van duurzame energie.

13 Zie STOWA rapport 2023-08, "LCA van acht grondstoffen uit rioolwater", ISBN 978.94.6479.010.8

De verspreiding van microplastics in het milieu door het gebruik van fossiele, niet afbreekbare plastics is een belangrijk aspect dat niet meegenomen is in deze analyse.

## 6.6 ONTWIKKELPUNTEN EN ONZEKERHEDEN VOOR DE WAARDE CASE

Er zijn nog de volgende belangrijke kanttekeningen te plaatsen bij de kostenramingen en LCA analyses zoals die zijn uitgevoerd tijdens het project. Deze kanttekeningen zijn de volgende:

- In de studies is er steeds van uitgegaan dat er een halffabricaat kan worden geproduceerd met een PHA-gehalte van 40% PHA (van de droge stof). Dit hoge percentage wordt wel bereikt in labstudies maar in de praktijkinstallatie in Dordrecht kon dit percentage niet bereikt worden en werd gemiddeld een percentage van 30-35% PHA (op organische stof basis) bereikt.
- De ontwatering van de PHA-rijke biomassa bleek in de praktijk tegen te vallen. In de studies is steeds aangenomen dat een slibkoek kan worden verkregen met een drogestofgehalte van 20% en een verwaarloosbaar verlies aan PHA. In de praktijk werd een duidelijk nattere slibkoek verkregen en ging veel PHA verloren via het rejectiewater.

Beide kanttekeningen zijn niet meegenomen bij de verwerking in de bovenstaande conclusies omdat wordt aangenomen dat deze prestaties door verdere optimalisatie kunnen worden verbeterd tot dicht bij de gehanteerde aannames. Dit zal echter nog wel moeten worden aangetoond.

# 7

## ONTWIKKELINGEN RONDOM PHA2USE

### 7.1 ONTSTAAN EN GROEI VAN PAQUES BIOMATERIALS

Het PHA2USE-project is begonnen met Paques als technologiepartner voor de productie van het PHA-rijk halffabricaat en de extractie van het materiaal. Vrij kort na de formele start van het project is Paques Biomaterials ontstaan als aparte entiteit. Dit nieuwe bedrijf staat volledig los van Paques maar is wel opgericht door Paques werknemers (Joost Pâques en René Rozendal). In april 2021 heeft het nieuwe bedrijf Paques Biomaterials de taken en verantwoordelijkheden van Paques in de samenwerkingsovereenkomst overgenomen.

Het ontstaan van Paques Biomaterials heeft ervoor gezorgd dat er volledige focus is ontstaan op het succesvol maken van de productie van Caleyda® uit organische reststromen. Gedurende het project is Paques Biomaterials uitgegroeid tot een bedrijf met meer dan 20 werknemers. Januari 2024 heeft Paques Biomaterials bekend gemaakt dat zij met een nieuwe financieringsronde 14 miljoen euro hebben opgehaald voor het verder uitbreiden van het bedrijf. Investeerders waren onder andere Invest-NL en de NOM<sup>14</sup>. Een belangrijk onderdeel van deze investering is de realisatie van een eigen extractie faciliteit. In deze installatie kan het resterende PHA-rijke halffabricaat worden geëxtraheerd evenals nieuw geproduceerd halffabricaat. Dit garandeert de beschikbaarheid van Caleyda® voor verder ontwikkeling van toepassingen.

Paques Biomaterials richt zich overigens niet alleen op het maken van Caleyda® uit zuiveringslib maar ook op productie van Caleyda® uit industriële reststromen.

### 7.2 NATIONALE EN INTERNATIONALE ERKENNING

Het project laat zien zeer inspirerend te zijn. Samen met kunstenaar Nynke Hoogvliet is een set van drie tafels ontwikkeld die laten zien waar Caleyda vandaan komt en wat je er mee kan doen. Het project heeft deelgenomen aan een tentoonstelling tijdens de Dutch Design Week en bezoekers gaven aan deze ontwikkeling heel positief en hoopvol te vinden. Deze expositie is ook bij de verschillende waterschappen tentoongesteld met veel positieve reacties tot gevolg.

Erkenning voor de innovativiteit van het project werd extern verkregen door de nominatie van de Beste Nederlandse Overheidsinnovatie van 2023. Na een uitgebreide jury beoordeling bereikte het project uiteindelijk de tweede plaats in deze competitie. De jury sprak vooral haar waardering uit voor de visie die de waterschappen hebben om in deze ontwikkeling te investeren en hoe zij dat in een samenwerking met elkaar en andere publieke en private partijen oppakken. Ook de jury van de European Public Sector Award in 2024 waardeerde deze manier van samenwerking zodanig dat zij PHA2USE als winnaar uitverkoos in de categorie "Green Transition and Sustainability". Tenslotte won het project ook nog de publieksprijs van de Circular Award 2024, georganiseerd door het

<sup>14</sup> Zie bijvoorbeeld: <https://www.h2owaternetwerk.nl/h2o-techniek/paques-biomaterials-haalt-eur14-miljoen-op-voor-bouw-demofabriek-pha>

Versnellingshuis Nederland Circulair! met steun van het ministerie van Infrastructuur en Rijkswaterstaat.

**FIGUUR 20** LINKS: TENTOONSTELLING OP DE DUTCH DESIGN WEEK, MIDDEN: BEZOEK VAN DE JURY VOOR DE BESTE OVERHEIDSINNOVATIE, RECHTS: UITREIKING EPSA AWARD VOOR PHA2USE



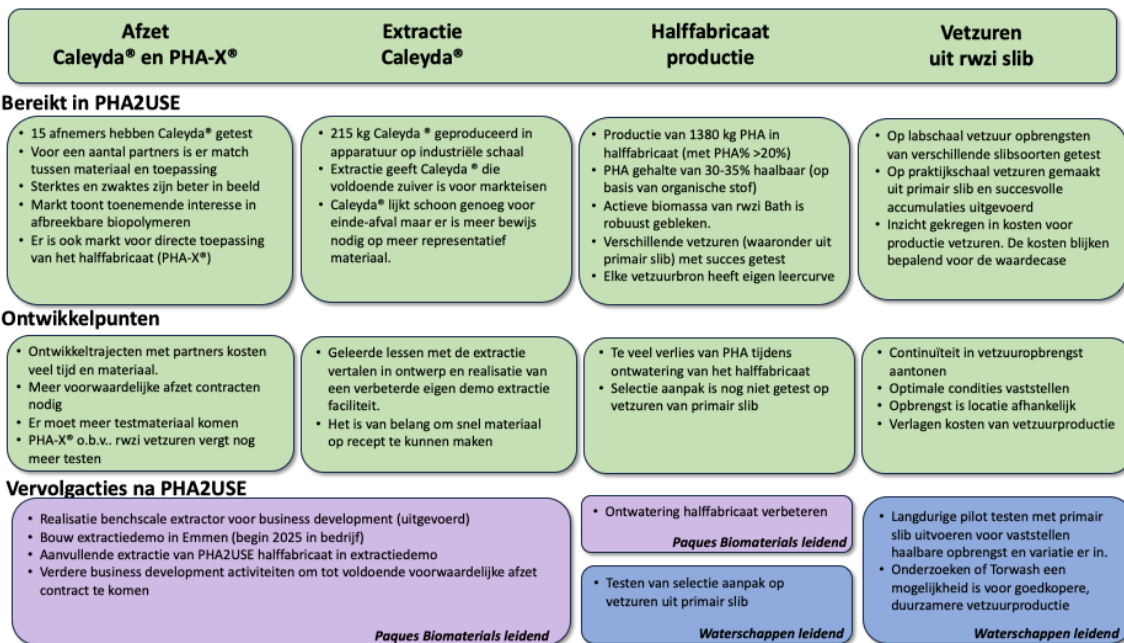
## 8

## EVALUATIE

## 8.1 SAMENVATTING RESULTATEN VAN PHA2USE

Figuur 21 geeft een samenvatting van de belangrijkste technische resultaten van het PHA2USE-project voor de verschillende deelstappen in de productie van Caleyda®. De eerste rij vat de belangrijkste resultaten samen die in het project zijn bereikt en de volgende rij vat de belangrijkste ontwikkelpunten samen. In de laatste kolom is aangegeven wat belangrijk vervolgstappen zouden moeten zijn om deze ontwikkelpunten aan te pakken en welke partij hierbij leidend zou moeten zijn.

FIGUUR 21 SAMENVATTING VAN DE RESULTATEN VAN HET PHA2USE-PROJECT, DE GEÏDENTIFICEERDE ONTWIKKELPUNTEN EN AANBEVOLEN VERVOLGACTIES NA PHA2USE



## 8.2 STAND VAN DE ONTWIKKELING

Een belangrijk doel van het PHA2USE-project voor de waterschappen was het investeerbaar maken van de ontwikkeling voor het maken van een plasticvervanger uit zuiveringslib. Hiervoor was meer duidelijkheid nodig over de werking van de techniek op grotere schaal en vooral meer inzicht in de afzet van de plasticvervanger Caleyda®. Een eerste grootschalige installatie zal altijd onzekerheden met zich meebrengen maar deze dienen zo goed mogelijk te zijn geminimaliseerd op basis van voorgaand onderzoek.

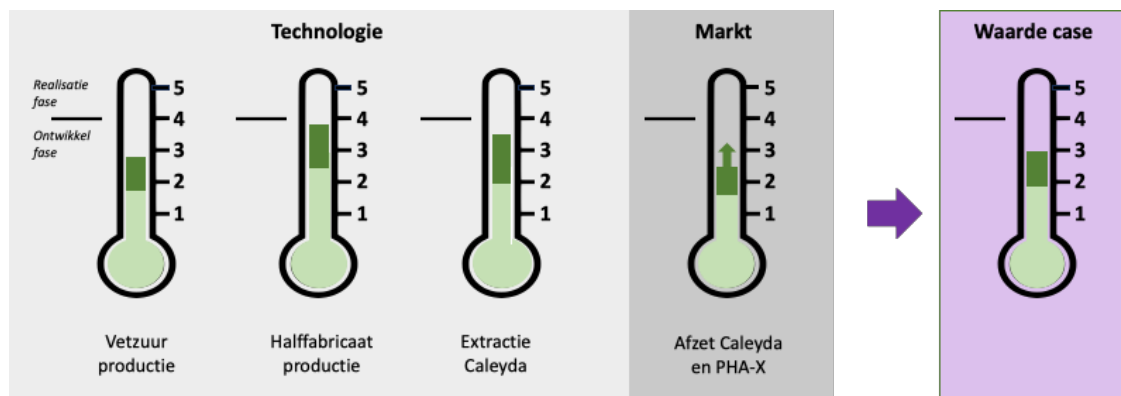
Door de unieke samenwerking in het PHA2USE-project van verschillende waterschappen in samenwerking met andere publieke en private partijen zijn er belangrijke stappen gezet in de ontwikkeling. Om inzicht te geven in deze ontwikkeling en de huidige stand van de ontwikkeling voor verschillende aspecten van de productie van Caleyda® zijn daarom een aantal schalen gedefinieerd van toenemende rijpheid voor een investering voor een instal-

latie op grote schaal. Deze loopt van niveau 1 tot niveau 5, waarbij niveau 5 een niveau aangeeft waarbij zoveel mogelijk is uitgezocht en de te nemen investering, de techniek en de waardecase helder zijn.

Voor de verschillende aspecten van de productie van Caleyda® geeft Figuur 22 de rijpheid weer in de vorm van een aantal thermometers. Daaruit wordt duidelijk dat verschillende aspecten verder zijn in de ontwikkeling dan andere aspecten. Idealiter zou voor alle aspecten minimaal niveau 4 bereikt moeten zijn. Dan eindigt de ontwikkelingsfase en kan toegewerkt worden naar de realisatie en uiteindelijk een definitieve investeringsbeslissing (niveau 5). Niveau 5 vergt een nadere uitwerking van het ontwerp en kostenraming en dat was geen onderdeel van het PHA2USE-project. De figuur laat voor de marktontwikkeling een nog stijgende score zien omdat deze ontwikkeling nog niet klaar is en er nog veel initiatieven lopen op basis van het materiaal dat in PHA2USE ter beschikking is gekomen.

De thermometers laten zien dat het PHA2USE-project de ontwikkeling een heel stuk verder gebracht heeft maar dat zeker nog niet voor alle onderdelen niveau 4 bereikt is. In figuur 22 is voor elk aspect aangegeven welke vervolgactiviteiten nog minimaal nodig zijn om dichterbij niveau 4 te komen.

**FIGUUR 22** EINDEVALUATIE VAN DE AFSTAND TOT EEN INVESTEERBAAR PROJECT VOOR VERSCHILLENDE ONDERDELEN VAN DE ONTWIKKELING. BIJ EEN SCHAAL VAN 5 IS DE ONTWIKKELING VOLLEDIG GEREED VOOR EEN INVESTERING EN ZIJN ALLE RISICO'S EN ONZEKERHEDEN ZO VEEL ALS MOGELIJK AFGEDEKT ALS MOGELIJK IS VOOR EEN INNOVATIEVE ONTWIKKELING



**LEGENDA**  
Licht groen: situatie voor PHA2USE  
Donker groen: gerealiseerd in PHA2USE

**Technologie**  
5. Investing gereed  
4. Goed inzicht in industrieel concept  
3. Onderbouwd technologisch concept  
2. Gedegen wetenschappelijk inzicht  
1. Goed idee

**Markt**  
5. Investing gereed  
4. Duidelijke marsroute naar marktvalidatie  
3. Goed perspectief op afzet  
2. Er is marktpotentie  
1. Goed idee

**Waarde case**  
5. Investing gereed  
4. Sterke basis met enkele onzekerheden  
3. Positieve waardecase op conceptueel niveau  
2. Goed perspectief op positieve waarde case  
1. Goed idee

Het verst ontwikkeld is de **accumulatie** van PHA. Al voorafgaand aan het PHA2USE-project was hier op pilot schaal veel ervaring mee opgedaan en ook op de schaal van PHA2USE werden deze resultaten bevestigd. De accumulatie is daarom een processtep waarvoor redelijk goed in beeld is hoe deze op grote schaal gebouwd moet worden. Wel zijn er nog aandachtspunten in de ontwikkeling voor deze stap.

Zo werd er gemiddeld een lager PHA-gehalte in de biomassa bereikt dan de gewenste doelwaarde van 40%. Niettemin waren er wel batches waarbij deze doelwaarde bereikt werd. De lagere PHA-gehalten lijken samen te hangen met de verzuringsgraad van de voeding, maar mogelijk spelen ook schaafeffecten en het ontwerp van de reactor een rol. Een tweede

belangrijk aandachtspunt bleek de ontwaterbaarheid van het PHA-rijke halffabricaat. Er ging veel materiaal verloren en er werd een vrij natte koek geproduceerd. Hoewel de accumulatie dus bijna niveau 4 bereikt heeft en goed op weg is naar niveau 5 zijn dit wel cruciale aandachtspunten die opgelost moeten worden. De selectieaanpak lijkt perspectief te bieden voor het omzetten van vetzuren uit zuiveringsslib in vergelijking met de PHARIO-aanpak, maar er is nog geen goede ervaring met deze aanpak in combinatie met vetzuren uit zuiveringsslib. Daarom wordt aanbevolen dit nog eerst te testen voor realisatie op een grote schaal.

De technologieontwikkeling voor de **extractie** van Caleyda® was voor de start van het project beperkter dan voor de accumulatie en bevond zich op slechts niveau 2, vooral door een gebrek aan voldoende halffabricaat voor het uitvoeren van de extracties. Door het project is er nu veel meer halffabricaat beschikbaar om ervaring op te doen met de extractie. Het beschikbare budget stond echter niet toe dat er een speciale installatie kon worden gerealiseerd voor de extractie en daarom was ingezet op het gebruik van bestaande pilotfaciliteiten. Uiteindelijk stond het beschikbare budget maar een beperkt aantal extractie campagnes toe, maar hier is wel veel geleerd. Door een goede voorbereiding op kleinere schaal kon redelijk goed voorspeld worden hoe de extractie op grotere schaal zou verlopen en dit bleek ook in de praktijk. Daarmee is in het project minimaal niveau 3 bereikt. Opschaling van de nu gebruikte apparatuur zou echter leiden tot te hoge investeringen. Daarom heeft Paques Biomaterials nieuwe concepten ontwikkeld die zij in de nabije toekomst in een nieuw te realiseren demonstratie-installatie willen uittesten. Het is de verwachting dat met deze installatie uiteindelijk ontwikkelniveau 4 kan worden bereikt in een periode van 1-2 jaar.

Ook de **verzuring** van zuiveringsslib bevond zich voor het project rond niveau 2. Wel was er in de literatuur en via flankerende onderzoeken informatie beschikbaar over haalbare opbrengsten. Deze lieten echter veel variatie zien en waren veelal ook niet gericht op het bereiken van een zo hoog mogelijke opbrengst. Veelal waren de onderzoeken gericht op het maken van een koolstofbron voor denitrificatie waarbij een hoge opbrengst van minder belang is. Via de testen in PHA2USE is er een duidelijke toename in het kennisniveau geweest, maar goede pilotinformatie ontbreekt nog waarbij gedurende langere tijd consistente opbrengsten zijn aangetoond. Dit zou nog moeten plaatsvinden om door te kunnen groeien naar niveau 4 voor deze stap in het proces.

**Marktontwikkeling:** voorafgaand aan het project was er heel weinig Caleyda® en PHA-X® voorhanden (slechts enkele kilogrammen) waardoor de ontwikkelingen van afzetmogelijkheden sterk gehinderd werd. De wel beschikbare informatie (voornamelijk uit het PHARIO-project) over de eigenschappen van het materiaal zorgden wel dat er interesse was in de potentie van het materiaal. Bij de start van het project werd het ontwikkelniveau daarom ingeschat op net iets onder 2.

Als we de resultaten in het project beoordelen aan de hand van de zelf gestelde doelen in het projectplan, dan kunnen we zeggen dat niet het beoogde niveau bereikt is. We hadden voor ogen dat we op het eind van het project op niveau 3 zouden zijn, in de praktijk zitten we tussen 2 en 3 in. Voor een investeringsbeslissing moeten we op niveau 5 zitten.

De volgende stap die nu gezet moet worden in het ontwikkelen van de markt is het toewerken naar niveau 3: het produceren van prototypes met het resterende Caleyda® voor de applicaties die onze focus hebben. Het genereren van deze prototypes zal met name gebeuren door het maken van compounds waar Caleyda® en/of PHA-X® in verwerkt is. Dit zal in overleg



met klanten worden gedaan, aangezien zij al relaties hebben opgebouwd met producenten. Als de resterende hoeveelheid Caleyda® is getest, zal er nog verdere applicatieontwikkeling nodig zijn om te komen tot voorlopige afnameovereenkomsten. Het PHA-rijk halffabricaat van Dordrecht zal hiervoor gebruikt worden, zowel voor de marktontwikkeling van Caleyda® (via de lab- en pilot extractielijn van Paques Biomaterials in Emmen) als voor PHA-X®.

**Waardecase:** Zowel de technologieontwikkeling als de ontwikkeling van de afzet van Caleyda® zijn bepalend voor de overall inschatting van de waardecase voor de productie van Caleyda®. Figuur 22 laat zien hoe deze verschillende ontwikkelniveaus zich vertalen tot een inschatting van de volwassenheid van de totale waardecase.

De projectdeelnemers schatten in dat de waardecase zich op het einde van PHA2USE op niveau 3 bevindt. Er zijn eerste investeringsramingen en haalbaarheidsberekeningen uitgevoerd die een positieve waardecase laten zien. Ook laten LCA-analyses goede resultaten zien. De uitstekende biologische afbreekbaarheid kan bijdragen aan het voorkomen van microplastic verspreiding maar dit effect kan niet meegenomen worden in LCA-studies. Wel zijn er zorgen over de relatief hoge investering in relatie tot de opbrengsten en de concurrentie met biogas als gevolg van stimulering van biogasproductie.

De gedane kostenramingen moet echter nog specifiek gemaakt worden voor de beoogde locaties en daarbij moeten de effecten van enkele technologische uitdagingen (zoals slechte ontwatering van de biomassa, lage PHA-gehaltes in biomassa, VFA-opbrengst) beter in beeld gebracht worden om niveau 4 te bereiken. Daarnaast is nog een beter beeld nodig van het afzetpotentieel van Caleyda® en het PHA-rijk halffabricaat. Ook zijn er nog onzekerheden rondom de einde-afval status.

### 8.3 ROUTEKAART NAAR OPSCHALING

De opbouw van een waardeketen vergt een nauwe afstemming tussen productie van halffabricaat, extractie en realisatie van afzet van Caleyda®. Paques Biomaterials is de partij die in toekomst zal zorgen voor extractie en afzet van Caleyda® en PHA-X®.

Tijdens het PHA2USE-project ontstond het inzicht dat er kansen zijn voor directe verkoop van het PHA-halffabricaat als PHA-X®. Dit kan helpen om de productie op te starten zonder dat de extractie al operationeel is. Paques Biomaterials verwacht nu eerst een upstream-installatie te bouwen die PHA-rijk halffabricaat uit afvalwater van de papierindustrie produceert en dit als PHA-X® verkoopt. Daarna verwacht men dat nog twee installaties volgen die gebaseerd zijn op industriële vetzuurbronnen met dezelfde afzetmogelijkheid. Ondertussen wordt met een demo-installatie voor extractie meer Caleyda® geproduceerd om het extractieproces te valideren en dit moet dan uiteindelijk resulteren in een full-scale extractiefaciliteit.

De productie van halffabricaat door de waterschappen zou passen in deze planning en zij kunnen een van de leveranciers zijn die straks halffabricaat leveren voor extractie als Caleyda®. Omdat er echter risico's verbonden zijn aan de realisatie van de downstream extractie (grote investering, complexe installatie) zou het ook voor waterschappen handig zijn als ook afzet als PHA-X® mogelijk is. Dit zal gezien de herkomst voor materiaal van de waterschappen complexer zijn dan voor wat schonere stromen uit de industrie.

De grootste kans op een relatief zuiver halffabrikaat (en dus afzet als PHA-X® hebben de waterschappen als zij kiezen voor de selectie aanpak en niet voor de PHARIO-aanpak met secundair slib. Risicovolle verontreinigingen als medicijnresten en persistente verbindingen zullen zich immers vooral hechten aan de onopgeloste delen in slib. De vervuiling van vetzuurrijk rejectiewater zal vermoedelijk significant lager zijn. Daarom lijkt het aan te bevelen voor de waterschappen om een eerste installatie te baseren op de selectieaanpak. Zodra de extractie installatie succesvol in bedrijf is zouden volgende installaties zich wel kunnen baseren op de PHARIO-aanpak. Bovendien lieten oriënterende berekeningen van Sweco zien dat de selectie aanpak mogelijk leidt tot lagere investeringskosten (zie paragraaf 6.3). Een andere optie voor waterschappen is om te wachten op de voltooiing van een extractiefaciliteit voordat ze in hun eigen installatie investeren.

# 9

## CONCLUSIE

Met het PHA2USE-project hebben de betrokken waterschappen een belangrijke stap gezet richting opschaling van de productie van Caleyda® uit organische reststromen. Niet eerder is op deze schaal Caleyda® geproduceerd en door het project zijn grotere hoeveelheden beschikbaar gekomen voor de ontwikkeling van markttoepassingen. De beschikbaarheid van dit materiaal heeft marktinteresse gewekt en dit heeft geleid tot goede interacties met de afnemers van het materiaal, zowel het pure Caleyda® als het PHA-rijke halffabricaat. Via dit soort interacties wordt steeds duidelijker welke toepassingen passen bij dit unieke materiaal en de allereerste voorwaardelijke afname contracten zijn in ontwikkeling. Het PHA2USE-project heeft hiermee een flinke impuls gegeven aan het verder volwassen maken van deze technologie. Dit blijkt ook uit de groei die het bedrijf Paques Biomaterials gedurende het project heeft doorgemaakt en de investeringen die het bedrijf heeft aange-trokken.

Studies die tijdens het project zijn uitgevoerd laten zien dat er een haalbare business case is voor waterschappen om een PHA-rijk halffabricaat voor Caleyda® te maken uit (met name primair) slib als grondstof (vetzuur) en zowel met en zonder secundair slib als actieve biomassa. Wel zijn forse investeringen nodig. De business case is het meest positief voor zuiveringen die beschikken over een voorbezinking en mogelijkheden hebben om de door PHA-productie vrijkomende gistingcapaciteit voor slib weer op te vullen. In deze studies is rekening gehouden met een verlies aan energiesubsidies doordat de productie van PHA de productie van biogas verlaagt. Als de productie van PHA eenzelfde mate van stimulering zou krijgen als die van groen gas zou de business case voor meer zuiveringen positief uitpakken. Nieuwe ontwikkelingen (zoals bijvoorbeeld Torwash) kunnen de business case verbeteren en daardoor meer haalbaar maken voor meer rioolwaterzuiveringen.

Door STOWA is een levenscyclusanalyse (LCA) uitgevoerd en die laat zien dat Caleyda® milieuvriendelijker heeft in vergelijking met fossiele plastics. Daarbovenop helpt Caleyda® de verspreiding van microplastics in het milieu terug te dringen. Helaas is deze impact nog niet goed kwantificeerbaar in LCA-analyses en daarom nog niet meegenomen hoewel er in de wetenschappelijk literatuur consensus is dat microplastics belangrijke risico's met zich meebrengen voor mens en milieu. Dat wordt bijvoorbeeld al onderkend in de Europese meststoffenverordening, waar niet-afbreekbare polymeren niet meer toegestaan worden per 2026.

Er is dus een relevante waardecase voor de productie van een PHA-rijk halffabricaat voor Caleyda® door de waterschappen. Vanuit economisch oogpunt zijn de hoge benodigde investeringen wel een aandachtspunt vanwege de risico's die samenhangen met een nieuwe technologie en afzet van een nieuw materiaal. Dit zal met name gelden voor de eerste installatie die zal worden gerealiseerd.

De resultaten uit de operatie laten echter wel zien dat er nog technische uitdagingen zijn rondom de opschaling van de techniek. Die uitdagingen zitten hem vooral in de mechanische ontwatering van het PHA-rijk halffabricaat. Tijdens deze stap gaat veel halffabricaat verloren en bovendien is de droogtegraad van de ontwaterde koek nog laag waardoor er veel energie voor de volgende droogstap nodig is. Hierdoor zijn in de praktijk nog niet de opbrengsten aangetoond waarmee wel gerekend is in de eerder beschreven haalbaarheidsstudies en dit is een belangrijk ontwikkelpunt.

# 10

## ACHTERGRONDDOCUMENTEN

De onderstaande lijst geeft een overzicht van achterliggende documenten die gebruikt zijn om dit openbare rapport samen te stellen. Deze achterliggende documenten zijn vertrouwelijk en vrij toegankelijk voor alle deelnemers in het PHA2USE-project. Ook zijn zij opvraagbaar voor andere waterschappen die interesse hebben in deze ontwikkeling en een toekomstige deelname hierin overwegen. Zij kunnen hiervoor terecht bij de in het PHA2USE-project betrokken waterschappen.

1. Promiko, "On the road to end-of-waste for PHARIO PHAs, a literature review", HVC100-4019609 – Version 1, 12/7/2024
2. Prevent Partner, "Toxicologische quick scan PHA componenten, PP240717FL, 17/7/2024
3. Fraunhofer, "Screening analysis of PHA for HVC", PA-1292-24, 26/6/2024
4. Royal HaskoningDHV, "Vetzuurproef Oldenzaal, BG8055-WM-ME-240405-1603, 18/7/2024
5. Sweco, "Haalbaarheidstudie PHA productie", NL23-648800269-67619, 19/12/2023
6. Sweco, notitie vergelijking selectie aanpak versus accumulatie aanpak, NL24-648800269-72455, 28/2/2024
7. Dranco, "Literatuurstudie, Volatile Fatty Acid productie potentiaal van RWZI slibstromen, F\_488\_Rev03, 16/12/2022
8. Dranco, "Eindrapport PHA2USE, VFA productie uit rwzi-slib, F\_489\_Rev04, 19/8/23
9. Witteveen + Bos, "Inventarisatie mogelijkheden PHA productie Dordrecht, adviesrapport", 131361.022.197.023, 21/11/2022.
10. Process Design Center, "Conceptual design study of a large full-scale extraction plant", project P947, version 7, 13/4/2022
11. Material safety datasheets (MSDS) en technical data sheets (TDS) voor verschillende Caleyda grades